

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia

Transecto Hidrogeomorfológico de um Sistema de Áreas Úmidas e Drenagem por Meio de
LiDAR Aerotransportado

Mariana Sanches Carone

Prof. Dr. Lucas Moreira Furlan

Rio Claro (SP)

2026

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus de Rio Claro

MARIANA SANCHES CARONE

TRANSECTO HIDROGEOMORFOLÓGICO DE UM
SISTEMA DE ÁREAS ÚMIDAS E DRENAGEM POR MEIO
DE LIDAR AEROTRANSPORTADO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para
obtenção do grau de Geóloga.

Rio Claro - SP

2026

C293t Carone, Mariana Sanches
Transecto hidrogeomorfológico de um sistema de áreas úmidas e drenagem por meio de lidar aerotransportado / Mariana Sanches Carone. -- Rio Claro, 2026
62 p. : tabs., fotos, mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Geologia) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Lucas Moreira Furlan

1. Tecnologias Geoespaciais. 2. Sensor LiDAR nativo. 3. Modelo Digital de Terreno. 4. Áreas Úmidas. 5. Bacia do Rio Corumbataí. I. Título.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A Organização das Nações Unidas (ONU) e seus países membros, incluindo o Brasil, adotaram a Agenda Pós-2015, que visa 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Esses objetivos são parte de um plano de ação global para eliminar os principais desafios que a sociedade enfrenta, com a meta de alcançá-los até 2030 (Unicef.org; Brasil.un.org).

O presente trabalho encontra-se especialmente alinhado à ODS 6 - Água Potável e Saneamento: assegurar a disponibilidade e a gestão sustentável da água e do saneamento para todas e todos; ao considerar a importância da proteção, monitoramento e gestão sustentável das águas superficiais. A investigação proposta contribui para o fortalecimento da qualidade e da disponibilidade hídrica, uma vez que o monitoramento sistemático desses ambientes permite identificar variações físico-químicas, impactos ambientais e possíveis riscos ao abastecimento e aos ecossistemas associados. Ao integrar técnicas de sensoriamento remoto e análise ambiental, o estudo apoia a meta de assegurar o uso eficiente da água, promover a melhoria da qualidade dos corpos hídricos e reforçar estratégias de conservação

POTENCIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The United Nations (UN) and its member countries, including Brazil, adopted the Post-2015 Agenda, which establishes 17 Sustainable Development Goals (SDGs). These goals are part of a global action plan aimed at addressing the main challenges faced by society, with the objective of achieving them by 2030 (Unicef.org; Brasil.un.org).

This study is particularly aligned with SDG 6 – Clean Water and Sanitation, which seeks to ensure the availability and sustainable management of water and sanitation for all. By emphasizing the importance of protecting, monitoring, and sustainably managing surface waters, the proposed investigation contributes to strengthening both water quality and availability. Systematic monitoring of these environments allows for the identification of physicochemical variations, environmental impacts, and potential risks to water supply and associated ecosystems. By integrating remote sensing techniques and environmental analysis, the study supports the goal of ensuring efficient water use, improving the quality of water bodies, and reinforcing conservation strategies.

MARIANA SANCHES CARONE

TRANSECTO HIDROGEOMORFOLÓGICO DE UM SISTEMA DE
ÁREAS ÚMIDAS E DRENAGEM POR MEIO DE LIDAR
AEROTRANSPORTADO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus
de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista
Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de
Geóloga.

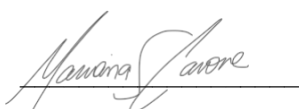
Comissão Examinadora

Prof. Dr. Lucas Moreira Furlan (orientador)

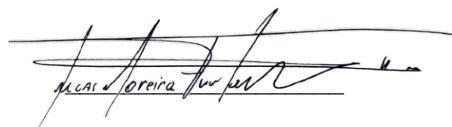
MSc. Beatriz Leonardo da Silva

Mestrando Lucas Henrique Garcia Gonzalez

Rio Claro, 29 de Junho de 2026.



Assinatura da aluna



Assinatura do orientador

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), pela oportunidade de desenvolvimento acadêmico e científico ao longo da graduação, bem como pelo suporte estrutural essencial à realização deste trabalho.

Ao UNESPetro – Centro de Ciências Naturais Aplicadas, pela infraestrutura e apoio institucional fornecidos durante a execução da pesquisa.

Ao Laboratório de Tecnologias Geoespaciais (LTGeo), pelo suporte técnico, através do Projeto FAPESP 2025/05455-3, com a disponibilização de equipamentos e ambiente propício ao desenvolvimento das atividades relacionadas à aquisição e processamento de dados. E também aos integrantes, por estarem presentes no dia-a-dia, sempre agregando à pesquisa.

Aos meus pais, Marcela e Edison, pelo apoio incondicional, incentivo constante e compreensão durante todo o percurso acadêmico e aos meus irmãos, Vinícius e Vicente, pelo companheirismo incondicional.

Ao Prof. Dr. Lucas Moreira Furlan, pela orientação, paciência e pelos valiosos ensinamentos ao longo de todos esses anos, desde as disciplinas lecionadas até a confiança para comigo nos programas de mentoria e monitoria.

Aos meus amigos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização deste trabalho, mas que se fizeram presentes em toda essa jornada geológica. Obrigada por tudo o que vivemos, carregarei vocês para sempre comigo – Arielson, Giulia, Isabella, Julia, Ketlyn, Larissa, Lucas, Matheus, Murilo, Nicolly, Tamiris e Thais.

Por fim, agradeço também aos professores do curso de Geologia, cuja formação e contribuições ao longo da graduação foram essenciais para o meu desenvolvimento profissional.

RESUMO

As áreas úmidas desempenham funções essenciais na regulação hidrológica, no armazenamento temporário de água e na manutenção da conectividade da paisagem. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo caracterizar um transecto hidrogeomorfológico composto por Áreas Úmidas Geograficamente Isoladas (AUGIs) e drenagem associada na Bacia do Rio Corumbataí, utilizando dados de LiDAR aerotransportado. O levantamento foi realizado com uma Aeronave Remotamente Pilotada (ARP) DJI Matrice 350 RTK equipado com sensor LiDAR Zenmuse L2. Os dados adquiridos foram processados para a geração de nuvens de pontos classificadas, Modelos Digitais de Superfície (MDS) e Modelos Digitais do Terreno (MDT), possibilitando a análise integrada da cobertura vegetal e da morfologia do terreno. A partir desses produtos, foram classificadas as áreas úmidas e a drenagem associada, além da extração de perfis topográficos e parâmetros morfométricos e volumétricos. Os resultados evidenciaram a ocorrência de AUGIs posicionadas em cotas superiores à drenagem principal, configurando um gradiente altimétrico favorável à retenção e transferência gradual dos fluxos hídricos. As comparações entre MDT e MDS demonstraram a influência da cobertura vegetal na representação geométrica das feições e nas estimativas de armazenamento potencial. Os resultados confirmam o potencial do LiDAR embarcado em ARP para a caracterização hidrogeomorfológica de áreas úmidas e sistemas de drenagem associados.

Palavras-chave: LiDAR aerotransportado; Áreas Úmidas Geograficamente Isoladas; hidrogeomorfologia; conectividade hidrológica; Bacia do Rio Corumbataí.

ABSTRACT

Wetlands play essential roles in hydrological regulation, temporary water storage, and the maintenance of landscape connectivity. In this context, the present study aimed to characterize a hydrogeomorphological transect composed of Geographically Isolated Wetlands (GIWs) and associated drainage features within the Corumbataí River Basin using airborne LiDAR data. The survey was conducted using a DJI Matrice 350 RTK Remotely Piloted Aircraft (RPA) equipped with a Zenmuse L2 LiDAR sensor. The acquired data were processed to generate classified point clouds, Digital Surface Models (DSMs), and Digital Terrain Models (DTMs), enabling an integrated analysis of vegetation cover and terrain morphology. Based on these products, wetlands and associated drainage features were classified, and topographic profiles, morphometric parameters, and volumetric analyses were obtained. The results revealed the occurrence of GIWs located at higher elevations than the main drainage channel, establishing an altimetric gradient favorable to water retention and the gradual transfer of hydrological flows. Comparisons between DTMs and DSMs demonstrated the influence of vegetation cover on the geometric representation of landforms and on potential storage capacity estimates. The findings confirm the potential of RPA-mounted LiDAR technology for the hydrogeomorphological characterization of wetlands and associated drainage systems.

Keywords: airborne LiDAR; Geographically Isolated Wetlands; hydrogeomorphology; hydrological connectivity; Corumbataí River Basin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da área de estudo, situada em relação ao município e ao estado.....	10
Figura 2. Contexto geológico local, com foco na área de estudo (distrito de Ajapí, Rio Claro -SP).	11
Figura 3. Localização da sub-bacia do Rio Corumbataí nas Bacias PCJ. Adaptado de PCJ, 2020.	12
Figura 4. Cobertura por classes do uso e ocupação da terra no município de Rio Claro, com foco no distrito de Ajapí. Retirado e adaptado de MAPBIOMAS, 2026.....	16
Figura 5. Drone modelo DJI Matrice 350 RTK.....	21
Figura 6. Sistema LiDAR Zenmuse L2. Modificado de DJI, 2025	22
Figura 7. Fluxo de trabalho seguido.	26
Figura 8. Estação móvel de alta precisão DJI D-RTK 2.....	27
Figura 9. Captura de tela do controle do drone, com o polígono de aquisição demarcado durante o planejamento do voo.	28
Figura 10. Estatísticas do processamento de ponto preciso para a base GNSS gerada e utilizada ao longo do projeto. IBGE, 2026.	33
Figura 11. Visualização da nuvem de pontos em “Color Lidar by RGB/Elev”.....	35
Figura 12. Visualização, em perspectiva, da nuvem de pontos em “Color Lidar by RGB/Elev”.	35
Figura 13. Visualização da nuvem de pontos em "Color Lidar by Classification".	36
Figura 14. A) Visualização em perspectiva do MDS. B) Visualização em planta do MDS. C) MDS com escala de altitude.	37
Figura 15. A) Visualização em perspectiva do MDT. B) Visualização em planta do MDT. C) MDT com escala de altitude.	37
Figura 16. Visualização em "Color Lidar by Classification" da AU α	38
Figura 17. A) Direção do perfil traçado na AU α . B) Perfil topográfico no MDS. C) Perfil topográfico no MDT.	40
Figura 18. Visualização em "Color Lidar by Classification" da AU β	41
Figura 19. A) Direção do perfil traçado na AU β . B) Perfil topográfico no MDS. C) Perfil topográfico no MDT.	43
Figura 20. Visualização em "Color Lidar by Classification" da drenagem.	45
Figura 21. A) Direção do perfil traçado na drenagem. B) Perfil topográfico no MDS. C) Perfil topográfico no MDT.	46
Figura 22. A) Direção do perfil traçado na cabeceira da drenagem. B) Perfil topográfico no MDS. C) Perfil topográfico no MDT.....	47
Figura 23. A) Direção do perfil traçado no médio curso da drenagem. B) Perfil topográfico no MDS. C) Perfil topográfico no MDT.....	49
Figura 24. A) Direção do Transecto Hidrogeomorfológico. B) Perfil topográfico do sistema, com potencial de acúmulo, e potencial conexão, para as feições no MDS. C) Perfil topográfico do sistema, com potencial de acúmulo, e potencial conexão, para as feições no MDT.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Potencial de armazenamento hídrico para a AU α nos modelos digitais.	39
Tabela 2. Potencial de armazenamento hídrico para a AU β nos modelos digitais.	42
Tabela 3. Potencial de armazenamento hídrico total do Sistema Áreas Úmidas - Drenagem.	52

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
1.1 Objetivos.....	9
1.2 Área de estudo.....	9
<i>1.2.1 Caracterização ambiental da bacia hidrográfica.....</i>	<i>12</i>
<i>1.2.2 Uso e cobertura da terra.....</i>	<i>15</i>
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 Relevância ecológica das áreas úmidas.....	17
2.2 Sensoriamento remoto suborbital aplicado em AUs	17
2.3 Aplicações de sensores LiDAR em AUs	19
2.4 Especificações técnicas da ARP e sensor utilizados no estudo	20
<i>2.4.1 Aeronave Remotamente Pilotada</i>	<i>20</i>
<i>2.4.2 Sensor LiDAR nativo.....</i>	<i>22</i>
2.5 Desafios no uso de ARPs	23
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	26
3.1 Aquisição de dados de campo	27
<i>3.1.1 Levantamento GNSS</i>	<i>27</i>
<i>3.1.2 Aquisição de dados LiDAR</i>	<i>27</i>
3.2 Processamento dos dados de campo.....	29
<i>3.2.1 Dados GNSS.....</i>	<i>29</i>
<i>3.2.2 Dados LiDAR brutos.....</i>	<i>30</i>
<i>3.2.3 Dados LiDAR pós-processados</i>	<i>31</i>
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
4.1 Nuvem de Pontos LiDAR com Correção RTK	33
4.2 Caracterização Hidrogeomorfológica da Área Úmida Alfa (AU α).....	37
4.3 Caracterização Hidrogeomorfológica da Área Úmida Beta (AU β).	41
4.4 Caracterização Hidrogeomorfológica da Drenagem Associada.....	44
4.5 Análise Integrada da Conectividade e Compartimentação Hidrogeomorfológica do Sistema Áreas Úmidas–Drenagem.	50
5. CONCLUSÃO	53
6. REFERÊNCIAS	55

1. INTRODUÇÃO

As áreas úmidas (AUs), ou *wetlands* (na bibliografia internacional) constituem ecossistemas de elevada relevância ecológica e socioambiental, atuando como reguladores do ciclo hidrológico, sumidouros de carbono e habitats essenciais para uma ampla diversidade de espécies. Além de prestarem serviços ecossistêmicos fundamentais, como a melhoria da qualidade da água e a contenção de enchentes, também oferecem recursos diretos às populações humanas, seja por meio da pesca, do turismo ou da disponibilidade de água para múltiplos usos (MITSCH & GOSSELINK, 2015).

Apesar de sua importância, esses ambientes são considerados altamente vulneráveis, e entre os principais fatores de atenção, destacam-se a conversão de áreas úmidas para fins agrícolas, a urbanização desordenada, a poluição difusa, a introdução de espécies invasoras e os efeitos das mudanças climáticas globais (JUNK & NUNES DA CUNHA, 2005; ROSOLEN *et al.*, 2019, 2025; XU *et al.*, 2019).

No Brasil, as AUs assumem papel de destaque no cenário de conservação da biodiversidade, abrigando ecossistemas estratégicos para a manutenção de serviços ecossistêmicos. O país possui atualmente 12 áreas reconhecidas como Sítios Ramsar (Área Úmida De Importância Internacional), que totalizam mais de 6,5 milhões de hectares, refletindo sua importância em escala internacional (BRASIL, 2024). Dentre os diferentes tipos de áreas úmidas reconhecidos no Brasil, destacam-se as Áreas Úmidas Geograficamente Isoladas (AUGIs), internacionalmente denominadas *Geographically Isolated Wetlands* (GIWs). Esses ambientes correspondem a áreas úmidas circundadas por terrenos mais elevados (*uplands*), nas quais não há conexão superficial permanente evidente com outros corpos hídricos (TINER, 2003). A denominação *Geographically Isolated Wetlands* foi proposta para enfatizar sua posição geomorfológica na paisagem, sem pressupor isolamento hidrológico ou ecológico. Dessa forma, embora geograficamente isoladas, essas áreas podem apresentar diferentes níveis de conectividade funcional com sistemas adjacentes por meio de fluxos subsuperficiais, eventos sazonais de inundação e processos biológicos (LEIBOWITZ, 2015).

Sob a perspectiva hidrogeomorfológica, a posição ocupada pelas áreas úmidas na paisagem exerce papel fundamental sobre seu funcionamento, uma vez que condiciona os padrões de armazenamento, circulação e descarga da água, influenciando diretamente os processos ecológicos e hidrológicos desses ecossistemas. Nesse contexto, Brinson (1993)

propôs a classificação hidrogeomorfológica (HGM), fundamentada nas características abióticas das áreas úmidas, evidenciando que a geomorfologia e o regime hidrológico constituem fatores determinantes para a compreensão de suas funções ambientais. Assim, a caracterização das AUGIs demanda abordagens capazes de representar, com elevado detalhamento, sua posição na paisagem e suas relações hidrogeomorfológicas com os compartimentos adjacentes.

Essas áreas desempenham funções ambientais fundamentais nos biomas brasileiros, incluindo armazenamento hídrico, recarga de aquíferos, retenção de sedimentos, ciclagem de nutrientes, sequestro de carbono e manutenção da biodiversidade, sendo consideradas importantes componentes da dinâmica hidrogeomorfológica e ecológica das paisagens (CASAGRANDE *et al.*, 2021; SALES *et al.*, 2021; FURLAN *et al.*, 2023).

As AUGIs apresentam elevada complexidade de investigação e caracterização física devido à natureza sutil de sua expressão na paisagem e às suas dinâmicas hidrogeomorfológicas frequentemente pouco evidentes. Em muitos casos, esses ambientes ocorrem como pequenas depressões fechadas com baixa amplitude topográfica em relação aos terrenos adjacentes dificultando sua identificação por métodos convencionais de mapeamento topográfico e sensoriamento remoto orbital (FURLAN *et al.*, 2023). Além disso, a presença recorrente de cobertura vegetal densa, associada às reduzidas dimensões espaciais desses sistemas, limita significativamente a eficiência de sensores orbitais de média resolução espacial, como os utilizados em plataformas multiespectrais tradicionais (GUO *et al.*, 2017; ANOKYE e HASHEMI-BENI, 2026).

Além de sua ocorrência individualizada na paisagem, as AUGIs podem integrar sistemas hidrogeomorfológicos mais complexos, estabelecendo relações funcionais com redes de drenagem superficiais e fluxos subsuperficiais (FURLAN *et al.*, 2021; GOMES *et al.*, 2022; FRANCO *et al.*, 2024). Embora muitas dessas conexões não sejam visualmente evidentes em condições hidrológicas normais, eventos sazonais, variações no nível freático e fluxos subterrâneos podem promover diferentes graus de conectividade entre áreas úmidas, canais de drenagem e compartimentos topográficos adjacentes. Dessa forma, compreender a organização espacial dessas feições e suas interações hidrogeomorfológicas exige abordagens capazes de representar, com elevado nível de detalhe, a microtopografia do terreno e os gradientes morfológicos responsáveis pela circulação e armazenamento da água na paisagem. Nesse contexto, métodos de alta resolução espacial, especialmente aqueles baseados em LiDAR aerotransportado e sensores embarcados em drones, podem ser ferramentas promissoras para a

detecção microtopográfica, modelagem tridimensional da superfície e análise detalhada destes ecossistemas na paisagem.

Entre as diferentes plataformas com potencial aplicação utilizadas em estudos hidrogeomorfológicos, as Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs), conforme definição estabelecida pela ANAC (2025), vêm se destacando pelo elevado potencial de aquisição de dados ambientais em alta resolução espacial. Essas plataformas possibilitam levantamentos flexíveis, de menor custo operacional e com elevado nível de detalhamento topográfico, permitindo a obtenção de produtos tridimensionais de alta precisão e resolução. Nesse contexto, a incorporação de sensores LiDAR aerotransportados representa um avanço significativo para análises hidrogeomorfológicas, uma vez que possibilita a geração de Modelos Digitais do Terreno (MDTs) com elevada acurácia, inclusive em ambientes com cobertura vegetal densa ou heterogênea (RESOP *et al.*, 2019; ANOKYE e HASHEMI-BENI, 2026). Essa capacidade favorece a identificação de feições sutis da paisagem, como microdepressões, divisores topográficos pouco expressivos, conexões hidrológicas sazonais e padrões de drenagem frequentemente mascarados em produtos orbitais convencionais, ampliando significativamente o potencial de análise de sistemas área úmida–drenagem em diferentes escalas espaciais.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo caracterizar um transecto hidrogeomorfológico de um sistema integrado de duas áreas úmidas e uma drenagem a partir da aquisição e processamento de nuvens de pontos obtidas por sensor LiDAR aerotransportado embarcado em Aeronave Remotamente Pilotada (ARP).

Os objetivos específicos do trabalho são:

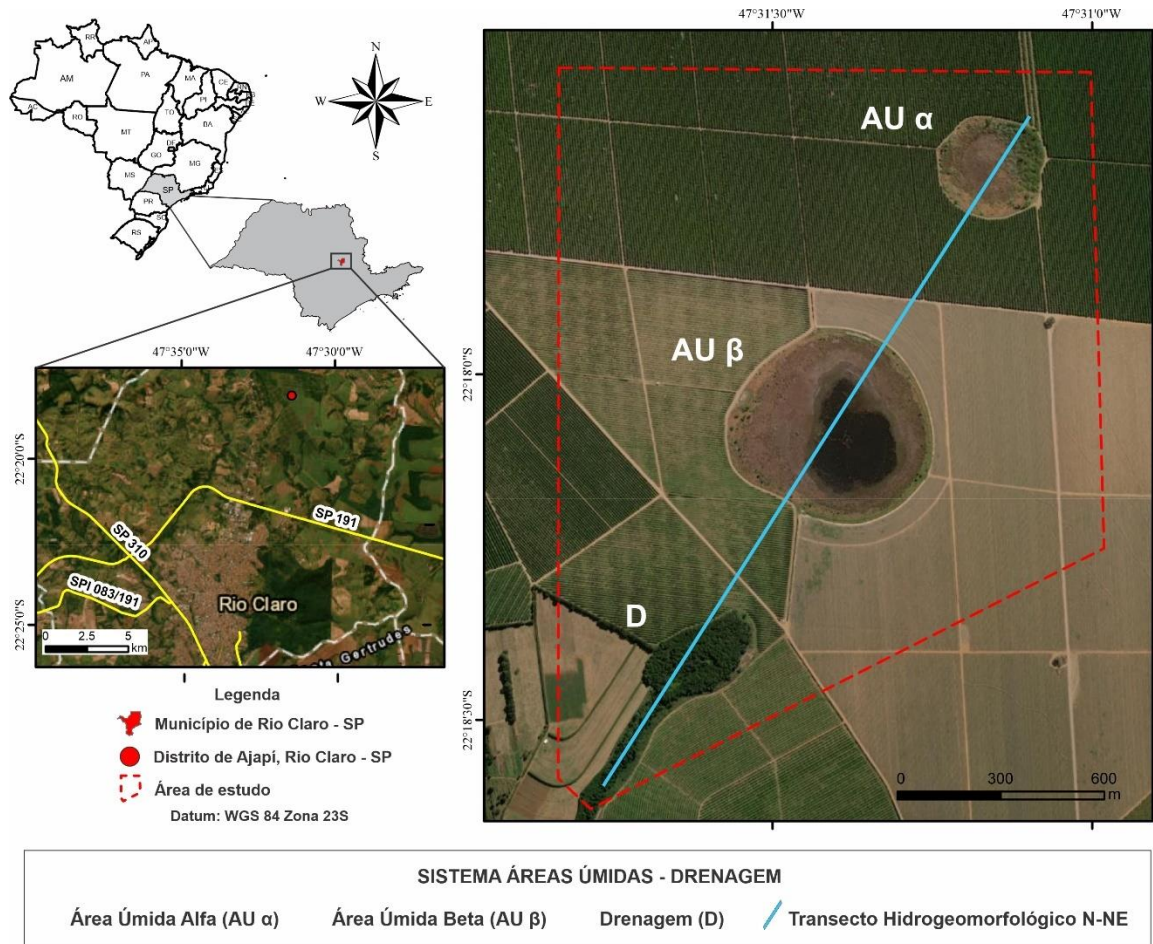
- Caracterizar a microtopografia e os padrões hidrogeomorfológicos do sistema áreas úmidas–drenagem, avaliando conexões hidrológicas potenciais e compartimentações da paisagem;
- Extrair parâmetros morfométricos das depressões identificadas, incluindo área, profundidade, declividade, perímetro e volume potencial de armazenamento hídrico.

1.2 Área de estudo

O presente estudo será conduzido na zona rural de Ajapi (Figura 1), distrito pertencente ao município de Rio Claro (SP), onde destacam-se duas áreas úmidas alinhadas a uma drenagem principal. Tomando como ponto de partida a Avenida 24 A (Unesp – Campus Prof. Dr. João

Dias da Silva), o acesso se dá pela Avenida Ulysses Guimarães sentido Avenida Brasil, seguindo por ela até a Estrada Vicinal Nicolau Marotti – Distrito Industrial.

Figura 1. Localização da área de estudo, situada em relação ao município e ao estado.



O transecto hidrogeomorfológico está inserido no contexto da Bacia Hidrográfica do Rio Corumbataí, situada na primeira zona hidrográfica do Estado de São Paulo, correspondente ao trecho superior do Rio Tietê, que se estende desde suas nascentes até a Barragem de Barra Bonita, totalizando aproximadamente 592 km de extensão (ATLAS-COR, 2011b).

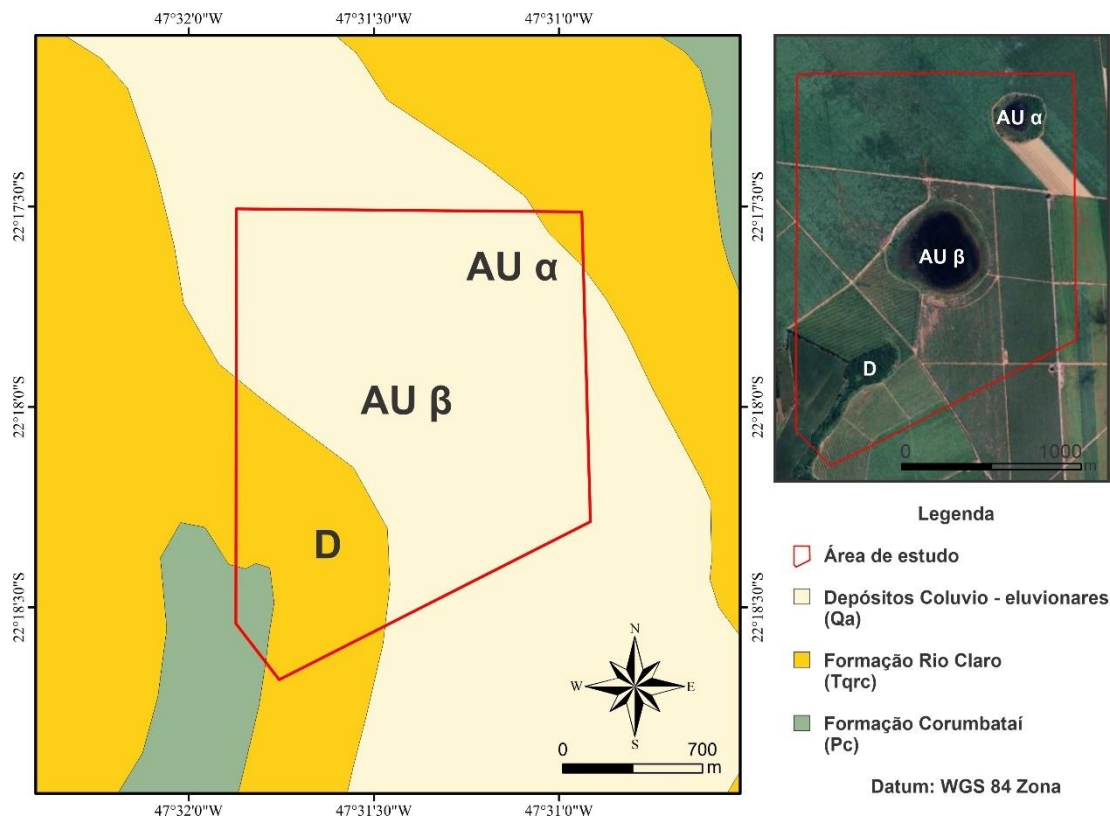
Do ponto de vista fisiográfico, a bacia do Corumbataí se desenvolveu ao longo do Cenozoico, com cabeceiras situadas nas cuestas basálticas da Serra Geral e foz no Rio Piracicaba, abrangendo altitudes entre 1.058 m, na Serra do Cuscuzeiro (Analândia), e 470 m, na confluência com o rio principal (ATLAS-COR, 2011a). Essa variação altimétrica confere à região um relevo suavemente ondulado a ondulado, característico da Depressão Periférica Paulista, unidade geomorfológica do Planalto Atlântico (ALMEIDA, 1964).

Geologicamente, a área está inserida na porção nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná, uma bacia intracratônica do tipo sinéclise, com formato alongado na direção NNE–

SSW, extensão de cerca de 1.750 km e largura média de 900 km (ZÁLAN *et al.*, 1990). Essa unidade geotectônica é preenchida por uma sucessão de rochas sedimentares e ígneas acumuladas desde o Ordoviciano até o Cretáceo, alcançando até 7.000 metros de espessura total (MILANI *et al.*, 2007).

Na região da bacia hidrográfica, afloram principalmente unidades do Grupo Passa Dois, com destaque para as Formações Irati e Corumbataí, compostas por folhelhos, siltitos e arenitos finos, intercalados a níveis carbonosos e margas. Localmente, essas unidades são recobertas por derrames basálticos do Grupo São Bento e/ou depósitos cenozoicos da Formação Rio Claro (Figura 2), constituídos por sedimentos areno-argilosos de origem coluvial e aluvial (SIQUEIRA, 2011). Essa diversidade litológica e o controle estrutural associado à evolução tectono-sedimentar do Permiano ao Cretáceo condicionam a morfologia atual e a distribuição das drenagens superficiais.

Figura 2. Contexto geológico local, com foco na área de estudo (distrito de Ajapí, Rio Claro -SP).

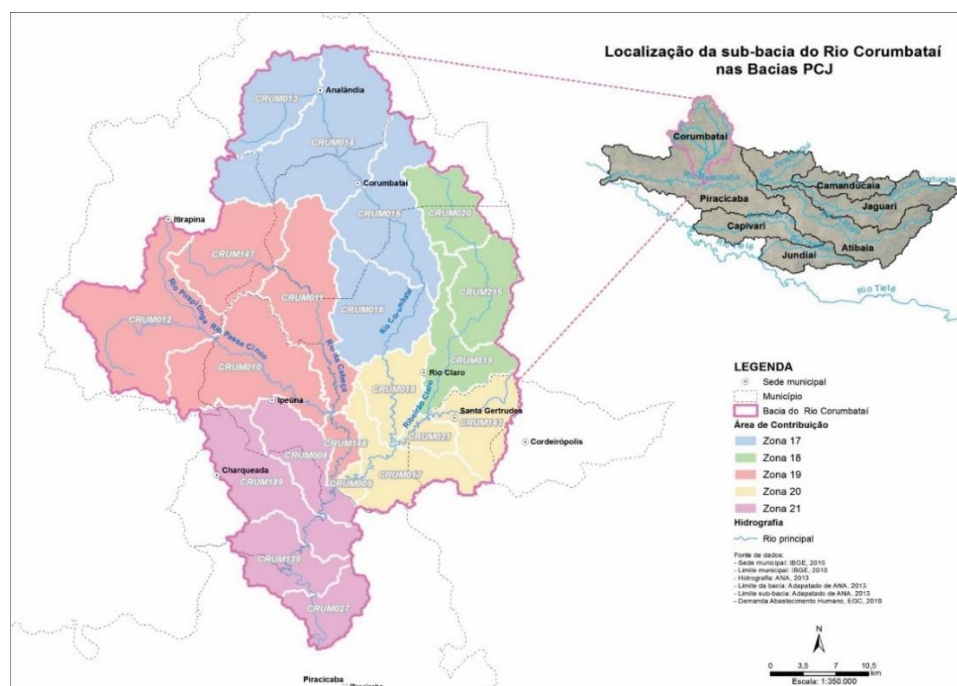


A Depressão Periférica Paulista, compartimento geomorfológico onde se insere a área de estudo, apresenta topografia suavizada e colinas amplas, com desníveis que raramente ultrapassam 200 metros, configurando um ambiente favorável à formação de corpos hídricos rasos e isolados, sem planícies aluviais importantes, e coberta por uma rede de drenagens de caráter dendrítico com orientação NE e NW (ALMEIDA, 1964).

1.2.1 Caracterização ambiental da bacia hidrográfica

A bacia hidrográfica do Rio Corumbataí está inserida no conjunto das bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (PCJ), localizadas na região sudeste do Brasil e pertencentes à vertente hidrográfica do alto Rio Paraná, por meio de sua drenagem para o Rio Tietê (Figura 3). No contexto regional, a Bacia do Corumbataí constitui uma sub-bacia da Bacia do Rio Piracicaba, integrando um sistema hidrográfico caracterizado por elevada relevância socioeconômica e intensa demanda por recursos hídricos. As bacias PCJ abrangem aproximadamente 15.300 km², distribuídos majoritariamente no estado de São Paulo e, em menor proporção, no sul de Minas Gerais, localizando-se entre os meridianos 46° e 49° oeste e as latitudes 22° e 23,5° sul, e apresentando uma extensão aproximada de 300 km, no sentido leste-oeste, e de 100 km, no sentido norte-sul. Essa região concentra importantes centros urbanos, polos industriais e áreas de produção agropecuária, o que resulta em significativa pressão sobre os recursos hídricos superficiais e subterrâneos (Agência Das Bacias PCJ, 2021; Comitês PCJ, 2020).

Figura 3. Localização da sub-bacia do Rio Corumbataí nas Bacias PCJ. Adaptado de PCJ, 2020.



O Rio Piracicaba, principal curso d'água do sistema, forma-se pela confluência dos rios Jaguari e Atibaia, no município de Americana, e percorre cerca de 250 km até desaguar no reservatório de Barra Bonita, no Rio Tietê. Ao longo de seu trajeto recebe diversos tributários relevantes, entre os quais se destaca Rio Corumbataí, um dos principais afluentes da margem direita do Piracicaba (COMITÊS PCJ, 2020). A Bacia do Corumbataí possui área aproximada

de 1.700 km², correspondendo a cerca de 11% da área total das bacias PCJ, e está localizada integralmente no estado de São Paulo, abrangendo municípios como Analândia, Corumbataí, Ipeúna, Rio Claro, Santa Gertrudes, Charqueada, Itirapina e Piracicaba. O Rio Corumbataí nasce nas proximidades da Serra de Santana, no município de Analândia, em área associada às escarpas da Cuesta Basáltica, e percorre aproximadamente 120 km até sua confluência com o Rio Piracicaba (COMITÊS PCJ, 2020; SANTOS & GARCIA, 2013).

A rede hidrográfica da bacia apresenta extensão total próxima de 1.700 km de cursos d'água, distribuídos em diferentes ordens fluviais e composta por diversos tributários, entre os quais se destacam os rios Passa Cinco, Cabeça, Ribeirão Claro e Ribeirão Jacutinga, além de numerosos córregos de menor porte. A organização da drenagem está diretamente relacionada às características geomorfológicas e estruturais da região, marcada pela transição entre os planaltos sedimentares da Bacia do Paraná e as escarpas da cuesta basáltica, o que condiciona a configuração do relevo e o padrão de escoamento superficial (SANTOS & GARCIA, 2013; COMITÊS PCJ, 2020).

Do ponto de vista climático, a região apresenta clima tropical com inverno seco (Cwa), segundo a classificação de *Köppen*, com regime pluviométrico caracterizado por forte sazonalidade. A precipitação média anual varia aproximadamente entre 1.200 e 1.600 mm, concentrando-se principalmente entre outubro e março, período responsável pela maior parte da recarga hídrica da bacia. Durante os meses de inverno ocorre redução significativa das chuvas, resultando em diminuição das vazões fluviais e maior dependência da contribuição do escoamento de base proveniente dos sistemas aquíferos (AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ, 2021; SÃO PAULO, 2018).

A disponibilidade hídrica da bacia resulta da interação entre precipitação, evapotranspiração, infiltração e escoamento superficial. Parte da água precipitada retorna à atmosfera por evapotranspiração, enquanto outra parcela infiltra no solo e contribui para a recarga dos aquíferos e para a manutenção das vazões dos cursos d'água. O Rio Corumbataí apresenta vazão média histórica próxima de 5,8 m³/s, embora valores inferiores possam ser registrados durante períodos de estiagem prolongada. Para fins de planejamento e gestão de recursos hídricos no âmbito das bacias PCJ, estima-se uma disponibilidade hídrica média em torno de 4,7 m³/s para essa sub-bacia, valor utilizado como referência para a alocação e o gerenciamento dos usos da água (COMITÊS PCJ, 2007; AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ, 2021).

A dinâmica hidroambiental da bacia também está fortemente associada às características hidrogeológicas do substrato regional. Inserida no domínio da Bacia Sedimentar

do Paraná, a área apresenta significativa interação entre águas superficiais e subterrâneas. Destacam-se, nesse contexto, o Sistema Aquífero Guarani, associado aos arenitos das formações Botucatu e Piramboia, e o Aquífero Serra Geral, constituído pelos derrames basálticos fraturados da Formação Serra Geral. O primeiro caracteriza-se por elevada porosidade e permeabilidade, favorecendo a infiltração e o armazenamento de água subterrânea, enquanto o segundo apresenta circulação de água principalmente em fraturas e descontinuidades estruturais. Em diversas áreas ocorre interação hidráulica entre esses dois sistemas aquíferos, possibilitando a circulação de água entre os basaltos fraturados e os arenitos subjacentes (REBOUÇAS; BRAGA; TUNDISI, 2006; INSTITUTO GEOLÓGICO; DAEE, 2005).

Além desses sistemas regionais, ocorrem aquíferos locais associados a unidades sedimentares superficiais, como os depósitos da Formação Rio Claro, constituídos predominantemente por sedimentos arenosos e areno-argilosos pouco consolidados. Esses depósitos apresentam elevada permeabilidade e desempenham papel importante na recarga local e na manutenção do escoamento de base dos cursos d'água de menor ordem, contribuindo para a sustentação das vazões durante períodos de estiagem (SÃO PAULO, 2018).

A bacia do Corumbataí abriga uma população estimada em aproximadamente 300 mil habitantes dentro de seus limites hidrográficos, considerando a parcela dos municípios inserida na área da bacia, enquanto a população total dos municípios abrangidos ultrapassa 700 mil habitantes. A ocupação territorial é predominantemente urbana, concentrada sobretudo nos municípios de Rio Claro e Piracicaba, que exercem papel central na dinâmica econômica regional (IBGE, 2022; SANTOS & GARCIA, 2013).

No que se refere aos usos da água, o abastecimento público constitui o principal uso consuntivo na bacia, sendo responsável pelo atendimento das populações urbanas de municípios inseridos total ou parcialmente na área de drenagem. Parte significativa da captação superficial destina-se aos sistemas de tratamento e distribuição que abastecem centros urbanos como Rio Claro, cuja rede de abastecimento depende em grande medida das águas do rio Corumbataí e de seus tributários. O setor industrial também apresenta participação relevante na demanda hídrica, especialmente em função da presença de polos industriais associados às cadeias cerâmica, metal-mecânica, química e alimentícia, com destaque para os municípios de Rio Claro e Santa Gertrudes. Já o setor agropecuário utiliza a água principalmente para irrigação localizada, dessedentação animal e atividades agroindustriais, associadas sobretudo ao cultivo de cana-de-açúcar, pastagens e culturas temporárias. Embora a irrigação não represente o maior

volume de captação na bacia, sua importância aumenta em períodos de estiagem, quando a disponibilidade hídrica tende a diminuir e os conflitos pelo uso da água podem se intensificar (AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ, 2021; COMITÊS PCJ, 2020).

1.2.2 Uso e cobertura da terra

A análise do uso e cobertura do solo no município de Rio Claro foi realizada com base nos dados disponibilizados pelo Projeto MapBiomass, iniciativa responsável pelo mapeamento anual da cobertura e uso da terra no Brasil, a partir da classificação de imagens de satélite (constelação *Landsat*) com resolução espacial de 30 metros. A plataforma disponibiliza uma série histórica de mapas anuais desde 1985 até 2024, possibilitando a análise da dinâmica espacial e temporal da ocupação do território brasileiro.

Os dados indicam predomínio de áreas classificadas como “agropecuária”, correspondendo à maior parcela do território analisado. Essa categoria engloba principalmente áreas agrícolas e pastagens, com destaque para o cultivo de cana-de-açúcar. A intensificação da agricultura mecanizada, sobretudo vinculada à produção sucroenergética, constitui um dos principais fatores responsáveis pelas transformações da paisagem nas últimas décadas, promovendo a substituição progressiva de formações naturais e de pastagens tradicionais.

Os remanescentes de vegetação nativa representam uma fração reduzida da área total e apresentam elevado grau de fragmentação. Essas formações correspondem majoritariamente a remanescentes florestais associados ao bioma Mata Atlântica, além de pequenas ocorrências de vegetação savânica vinculadas ao Cerrado. Em geral, esses fragmentos concentram-se em áreas de preservação permanente, especialmente ao longo de cursos d’água, em encostas ou em terrenos com menor aptidão agrícola.

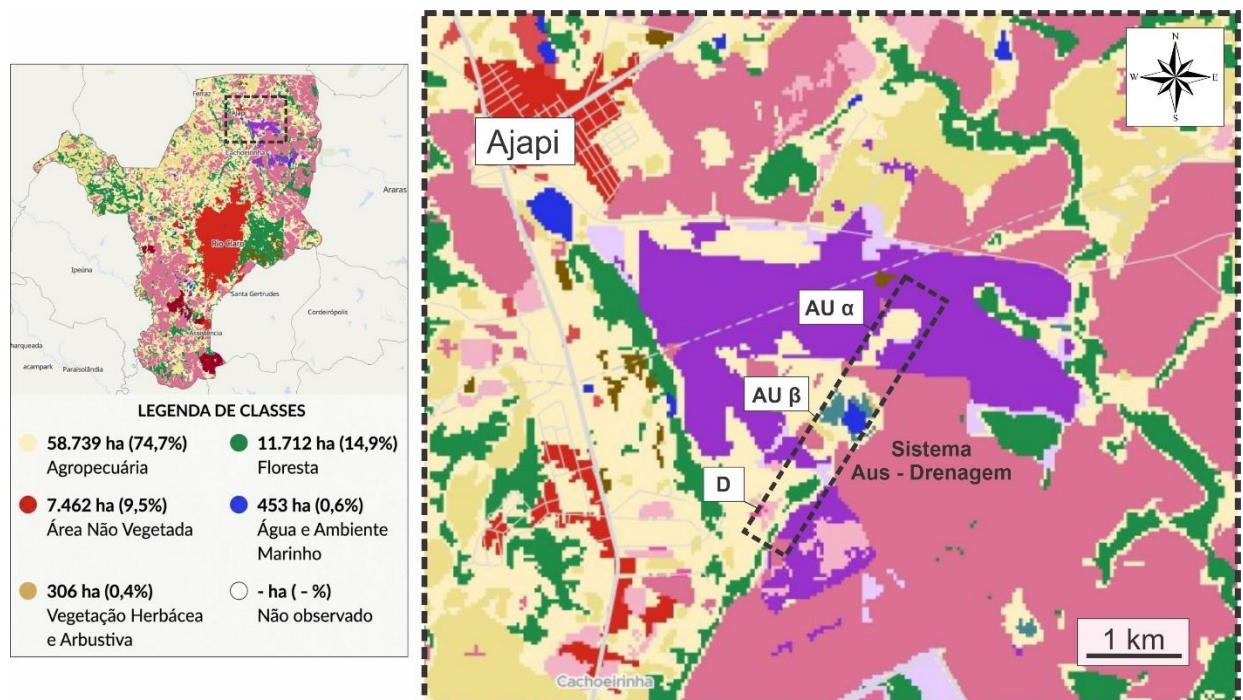
Também são identificadas áreas destinadas à silvicultura, associadas principalmente ao cultivo de espécies de rápido crescimento, como o eucalipto. Embora ocupem uma parcela menor da superfície territorial, essas plantações apresentam expansão em determinados setores, frequentemente substituindo áreas anteriormente destinadas à pecuária ou a outros usos agrícolas.

As superfícies urbanizadas correspondem a uma porção relativamente pequena da área total, porém apresentam tendência de crescimento ao longo do tempo. O avanço da mancha urbana ocorre principalmente nas zonas periféricas do município, e ao longo dos principais eixos de transporte e infraestrutura regional, processo relacionado à expansão populacional, industrial e econômica da região.

Além dessas categorias predominantes, também ocorrem áreas ocupadas por corpos d'água, superfícies expostas e atividades minerárias, especialmente voltadas à extração de areia e argila. Apesar de ocuparem extensões territoriais reduzidas, essas atividades possuem relevância econômica no contexto regional.

A distribuição do uso e cobertura do solo no município, com foco no distrito de Ajapi e baseada nos dados do ano de 2024, pode ser melhor observada na figura a seguir (Figura 4).

Figura 4. Cobertura por classes do uso e ocupação da terra no município de Rio Claro, com foco no distrito de Ajapi. Retirado e adaptado de MAPBIOMAS, 2026.



2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Relevância ecológica das áreas úmidas

As áreas úmidas são ecossistemas de transição entre ambientes terrestres e aquáticos, caracterizados por solos hidromórficos, vegetação adaptada à saturação hídrica e dinâmicas ecológicas sazonais fortemente influenciadas pelo regime de inundação (MITSCH & GOSSELINK, 2015). Esses ambientes desempenham papel essencial na manutenção da biodiversidade, atuando como refúgios para espécies endêmicas, reguladores de fluxos hidrológicos e sumidouros de carbono atmosférico (JUNK & NUNES DA CUNHA, 2012). Além disso, oferecem serviços ecossistêmicos fundamentais, como controle de cheias, recarga de aquíferos e purificação da água, sendo considerados áreas prioritárias para a conservação ambiental em escala global (RAMSAR, 2016).

Apesar dessa importância reconhecida, as AUs estão entre os ecossistemas mais ameaçados do planeta. De acordo com Junk *et al.* (2011), a maioria das áreas de várzea do baixo curso do Rio Amazonas foram degradadas ou perdidas, principalmente em decorrência da expansão agropecuária, resultando na alteração biota local. No Brasil, embora existam iniciativas relevantes de proteção, como o reconhecimento de sítios Ramsar e a criação de unidades de conservação, a carência de políticas públicas integradas e de monitoramento sistemático tem comprometido o planejamento territorial e a efetividade das ações de conservação (BRASIL, 2019).

Dentre as diversas classes de áreas úmidas existentes no Brasil, as Áreas Úmidas Geograficamente Isoladas (AUGIs) correspondem a ambientes úmidos completamente circundados por terrenos mais elevados, em geral, de pequena extensão e localizadas em bacias hidrográficas intensamente antropizadas, onde predominam usos agroindustriais e urbanos, o que intensifica processos de fragmentação e perda de conectividade ecológica (CASAGRANDE, 2023). Em São Paulo, a expansão do setor sucroenergético, voltado à produção de etanol e açúcar, impõe o desafio de equilibrar o crescimento econômico com a adoção de práticas sustentáveis que reduzam os impactos ambientais e contribuam para a preservação das AUs (Retirado de CASAGRANDE, 2023 e adaptado de FILOSO *et al.*, 2015)

2.2 Sensoriamento remoto suborbital aplicado em AUs

O sensoriamento remoto, entendido como o conjunto de técnicas que permitem a obtenção de informações da superfície terrestre a partir de sensores instalados em plataformas orbitais ou suborbitais, tem se consolidado como uma das principais ferramentas para o

monitoramento ambiental (LILLESAND; KIEFER; CHIPMAN, 2015), possibilitando a coleta sistemática de dados em diferentes escalas espaciais e temporais, permitindo análises comparativas, detecção de mudanças e mapeamentos temáticos com maior precisão.

Historicamente, as imagens orbitais (como as das constelações satélites *Landsat*, *Sentinel* e *MODIS*) desempenharam papel central na caracterização de ecossistemas aquáticos e terrestres. Sua ampla cobertura e séries temporais extensas facilitaram estudos de dinâmica da vegetação, uso e cobertura da terra e variações hidrológicas (ANDERSON *et al.*, 2018). Contudo, apesar das vantagens nas macrorregiões, essas plataformas apresentam limitações associadas à resolução espacial, à cobertura de nuvens e à baixa flexibilidade temporal, como dados diários, o que restringe sua aplicação em estudos locais e em ambientes de pequena extensão, como as AUGIs. Essas limitações estimularam a aplicação de plataformas suborbitais (como as ARPs), capazes de operar em baixas altitudes, de forma rápida e barata, garantindo uma maior resolução espacial e maior flexibilidade temporal de aquisição. Essa evolução tecnológica ampliou significativamente as possibilidades de mapeamento ambiental, permitindo análises mais detalhadas de microambientes e de processos dinâmicos em escala local (COLOMINA & MOLINA, 2014).

O sensoriamento remoto suborbital corresponde à coleta de dados realizada a partir de plataformas aéreas que operam abaixo da órbita terrestre, como aviões, helicópteros e drones. Dentre essas, os drones (termo defendido por CHABOT *et al.*, 2022) têm se destacado por seu baixo custo operacional, facilidade de uso e versatilidade na aquisição de dados (GONÇALVES & HENRIQUES, 2015). A incorporação de câmeras multiespectrais, hiperespectrais e sensores LiDAR em drones expandiu as aplicações dessa tecnologia para o monitoramento de vegetação, corpos d'água, solos expostos e estruturas antrópicas (LUCIEER *et al.*, 2014).

No âmbito dos levantamentos topográficos, os drones têm permitido avanços significativos na geração de modelos digitais de terreno (MDT) e modelos digitais de superfície (MDS), fundamentais para a análise de topografia, drenagem e dinâmica hidrológica (TURNER *et al.*, 2012). Além disso, a integração de dados de sensoriamento remoto suborbital com informações de campo possibilita abordagens multiescalares, aprimorando a precisão e a representatividade dos resultados (HARWIN & LUCIEER, 2012).

No caso específico das áreas úmidas, os drones têm se mostrado ferramentas promissoras para o mapeamento e monitoramento de ecossistemas (MARTINS, 2022), principalmente por se tratar de um método pouco invasivo (CASAGRANDE, 2023). Essa abordagem oferece resolução espacial suficiente para distinguir micro-habitats e feições

topográficas sutis, muitas vezes imperceptíveis em imagens orbitais convencionais. A aerofotogrametria por drones, associada a algoritmos de classificação supervisionada e técnicas de aprendizado de máquina, tem se tornado um padrão em estudos recentes voltados à caracterização topográfica (CARBONNEAU & DIETRICH, 2016).

No Estado de São Paulo, as Áreas Úmidas Geograficamente Isoladas (AUGIs) ocorrem principalmente nos setores das Cuestas Basálticas e da Depressão Periférica Paulista, com destaque para a região da Bacia do Rio Corumbataí, onde predominam atividades agropecuárias e intensas transformações do uso da terra (FURLAN *et al.*, 2024). Nesse contexto, os autores ressaltam a importância do emprego de tecnologias geoespaciais para a identificação, o inventário e o monitoramento dessas feições, uma vez que métodos convencionais frequentemente apresentam limitações para detectar e caracterizar ambientes úmidos de pequena escala.

Dessa forma, o uso de ARPs amplia significativamente a capacidade de observação e monitoramento desses ecossistemas, contribuindo para a geração de informações mais precisas sobre sua distribuição, funcionamento e estado de conservação, além de fornecer subsídios para ações de manejo, monitoramento e governança ambiental (FURLAN *et al.*, 2021; FURLAN *et al.*, 2024). Entretanto, essas tecnologias ainda enfrentam desafios operacionais, técnicos e normativos que limitam sua aplicação em determinados contextos ambientais.

2.3 Aplicações de sensores LiDAR em AUs

O emprego de sensores LiDAR tem se destacado como uma das abordagens mais promissoras para a caracterização e o monitoramento de áreas úmidas, principalmente em razão de sua capacidade de fornecer informações topográficas de alta resolução e representar com precisão a estrutura física desses ambientes. Segundo Anokye e Hashemi-Beni (2026), a principal contribuição dessa tecnologia está na possibilidade de compreender a dinâmica entre relevo, hidrologia e vegetação, elementos fundamentais para o funcionamento dos ecossistemas úmidos. Os autores ressaltam também que pequenas variações altimétricas frequentemente controlam a distribuição da água, a conectividade hidrológica e os padrões de inundação, tornando os modelos digitais derivados de LiDAR ferramentas essenciais para a análise desses processos.

Nesse contexto, os dados LiDAR permitem identificar microdepressões, áreas de acúmulo hídrico, zonas potencialmente inundáveis e rotas preferenciais de escoamento superficial com elevada precisão (USDA, 2014). Além disso, a capacidade de penetração

parcial do feixe laser através da cobertura vegetal possibilita a geração de modelos digitais do terreno confiáveis mesmo em ambientes densamente vegetados, característica particularmente relevante para áreas úmidas onde a vegetação pode dificultar a aquisição de informações topográficas por métodos convencionais (DING *et al.*, 2011).

Anokye e Hashemi-Beni (2026) destacam ainda que a integração entre métricas topográficas e informações estruturais da vegetação obtidas pelo LiDAR permite uma compreensão mais abrangente dos fatores que controlam os processos de inundação e a dinâmica ecológica desses ambientes. Essa abordagem possibilita avaliar não apenas a configuração física das áreas úmidas, mas também sua resposta a eventos hidrológicos extremos e alterações ambientais. De forma complementar, estudos recentes demonstram que variáveis derivadas de dados LiDAR apresentam forte correlação com atributos ambientais, como regime de inundação, umidade do solo e distribuição da cobertura vegetal, reforçando sua aplicabilidade em análises hidrológicas e na delimitação desses ecossistemas (GUO *et al.*, 2017; RAPINEL *et al.*, 2023).

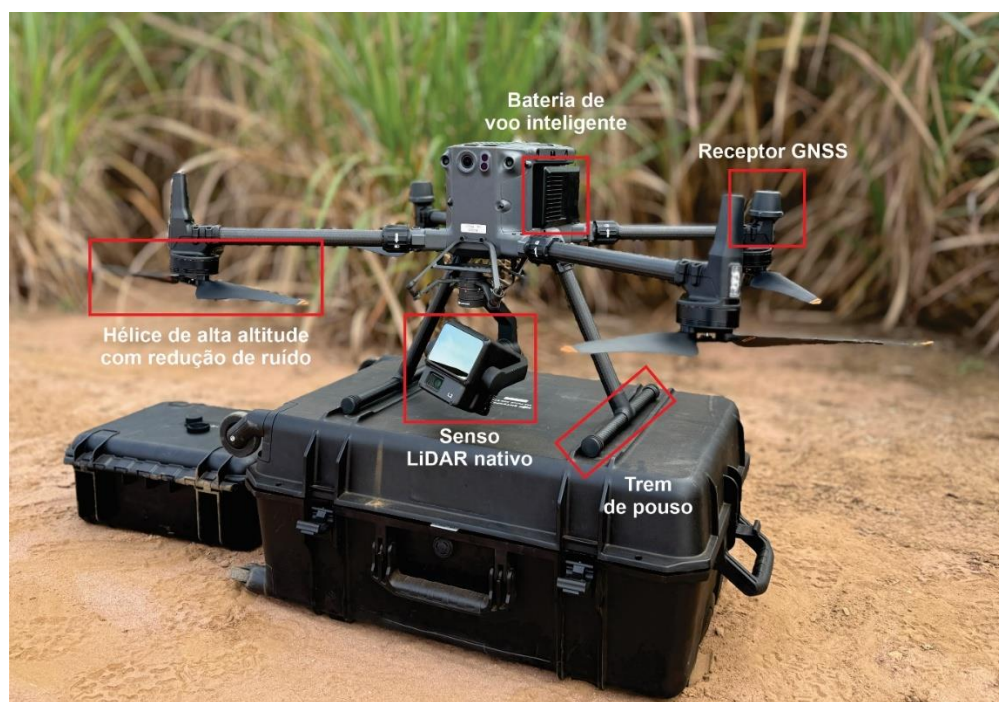
Com o avanço das plataformas suborbitais, a utilização de sensores LiDAR embarcados em drones tem ampliado ainda mais o potencial dessa tecnologia, permitindo levantamentos de alta resolução espacial, maior flexibilidade operacional e aquisição de dados em escalas compatíveis com estudos locais. Dessa forma, o LiDAR se consolida como uma ferramenta robusta para a caracterização ambiental de áreas úmidas, contribuindo significativamente para a compreensão de sua dinâmica hidrológica, para o monitoramento ambiental e para o desenvolvimento de estratégias voltadas à conservação desses ecossistemas.

2.4 Especificações técnicas da ARP e sensor utilizados no estudo

2.4.1 Aeronave Remotamente Pilotada

O DJI Matrice 350 RTK (dji.com) é um drone multirrotor de nível industrial, projetado para alta performance e resiliência (Figura 5). Em configuração de voo (desdobrado, sem hélices), suas dimensões são $810 \times 670 \times 430$ mm (C×L×A), com uma distância diagonal entre eixos de 895 mm. A estrutura possui um peso de aproximadamente 3,77 kg (sem baterias) e atinge um peso operacional de 6,47 kg quando equipado com duas baterias de voo inteligentes TB65. O peso máximo de decolagem (MTOW) da plataforma é de 9,2 kg.

Figura 5. Drone modelo DJI Matrice 350 RTK.



A aeronave possui uma classificação de proteção de ingresso IP55, garantindo resistência contra a entrada de poeira e jatos de água de baixa pressão, permitindo operações em condições ambientais adversas. O intervalo de temperatura operacional certificado é de -20 °C a 50 °C. O sistema de propulsão permite um tempo máximo de voo de 55 minutos (aferido sem carga útil). A plataforma atinge uma velocidade horizontal máxima de 23 m/s e demonstra uma resistência máxima ao vento de 12 m/s. A altitude máxima de serviço (teto de serviço) é de 7.000 metros (requer o uso de hélices de alta altitude).

O Matrice 350 RTK utiliza um sistema de bateria dupla (*dual-battery system*) modelo TB65. Este sistema suporta a funcionalidade de *hot-swap* (troca a quente), permitindo a substituição das baterias de forma independente sem a necessidade de desligar a aeronave, garantindo a continuidade da missão. Cada bateria TB65 possui uma capacidade nominal de 5880 mAh e um ciclo de vida útil de 400 ciclos de carga. A recarga é gerenciada pela Estação de Bateria Inteligente BS65.

A aeronave é equipada com um receptor GNSS multi-constelação (GPS, GLONASS, *BeiDou*, *Galileo*). Quando integrado ao sistema *Real-Time Kinematic* (RTK), o Matrice 350 RTK atinge precisão de nível centimétrico. A precisão de posicionamento com RTK fixo é de 1 cm + 1 ppm (horizontal) e 1,5 cm + 1 ppm (vertical). A plataforma é dotada de um sistema visual binocular omnidirecional, fornecendo detecção de obstáculos em seis direções,

complementado por um sistema de detecção por infravermelho (ToF). Para detecção de obstáculos finos (ex: cabos), a aeronave é compatível com o Radar CSM (*Circular Scanning Millimeter-Wave*) opcional. Uma câmera FPV (*First-Person View*) aprimorada com capacidade de visão noturna auxilia na navegação em condições de baixa luminosidade. O enlace de dados e vídeo é operado pelo sistema DJI O3 *Enterprise Transmission*, que oferece um alcance máximo de 20 km (FCC) e transmissão de vídeo em 1080p. O sistema é controlado através do DJI RC Plus, um controle remoto com classificação IP54 e tela integrada de 7,02 polegadas de alto brilho (1200 nits).

O drone suporta uma carga útil máxima de 2,7 kg, oferecendo múltiplas configurações de montagem, incluindo *gimbal* descendente único, *gimbal* descendente duplo, *gimbal* ascendente único, ou configurações mistas (ascendente e descendente).

2.4.2 Sensor LiDAR nativo

O sensor DJI Zenmuse L2 (Figura 6) é uma carga útil (*payload*) de mapeamento de alta precisão, desenvolvida para integração nas plataformas Matrice 300 RTK e Matrice 350 RTK. O sistema consolida, em uma única unidade de *gimbal* estabilizada, um módulo LiDAR de tecnologia baseada em quadro (*frame-based*), uma Unidade de Medida Inercial (IMU) de alta acurácia e uma câmera mapeadora CMOS de 4/3". O conjunto possui classificação de proteção IP54, garantindo operabilidade em ambientes com poeira e umidade moderada.

Figura 6. Sistema LiDAR Zenmuse L2. Modificado de DJI, 2025



O sensor emprega pulsos *laser* para medição de distância com capacidade de detecção multialvo. O sistema apresenta um alcance de detecção de 250 metros para objetos com 10% de refletividade e até 450 metros para objetos com 50% de refletividade; a precisão de alcance

é nominalmente de 2 cm a uma distância de 150 metros. O L2 suporta até 5 retornos de sinal, o que é fundamental para a extração do terreno sob cobertura vegetal densa. A taxa de emissão de pontos atinge 240.000 pts/s em retorno único e até 1.200.000 pts/s em múltiplos retornos. O dispositivo permite alternar entre o modo de varredura repetitiva (varredura linear para mapeamento tradicional) e varredura não repetitiva (padrão circular que aumenta a cobertura da área central).

A precisão do georreferenciamento direto é garantida por uma IMU de alto desempenho integrada ao sistema GNSS do drone. Apresenta uma precisão de atitude de 0,015° (RMS) para Arfagem e Rolagem, e 0,04° (RMS) para Guinada em tempo real. Diferente de gerações anteriores, a IMU do Zenmuse L2 dispensa o período de aquecimento térmico (*warm-up*), permitindo o início da coleta de dados imediatamente após a decolagem e estabilização do sistema.

Para fins de colorização da nuvem de pontos e fotogrametria auxiliar, o sistema incorpora um sensor óptico de alta performance CMOS de 4/3 de polegada e 20 megapixels. A câmera utiliza um obturador mecânico, prevenindo o efeito de *rolling shutter* (distorção por movimento) e garantindo a integridade geométrica das imagens em voos de alta velocidade. O intervalo de disparo é de apenas 0,7 segundos, permitindo alta sobreposição de imagens mesmo em velocidades de cruzeiro elevadas.

A integração dos três sensores (LiDAR, IMU e RGB) permite a entrega de produtos cartográficos com erro sistemático reduzido, já que voando a uma altitude de 150 metros e velocidade de 15 m/s, o sistema atinge uma precisão horizontal de 5 cm e uma precisão vertical de 4 cm (de acordo com o fabricante). Os dados brutos são processados nativamente no *software* DJI Terra, que realiza a fusão dos dados da IMU, trajetórias GNSS e nuvem de pontos para gerar modelos 3D georreferenciados e modelos digitais de superfície/terreno (MDS/MDT).

2.5 Desafios no uso de ARPs

Para além de considerações técnicas, como os tipos de mapeamento, tipos de voo e sensores utilizados, outro fator a ser considerado na obtenção de dados é a influência das condições climáticas, já que implicam diretamente na qualidade desses dados e na segurança das operações. Ventos fortes, precipitação, variações bruscas de temperatura e alta umidade relativa pode comprometer a estabilidade do voo e afetar o desempenho de sensores ópticos e LiDAR, resultando em ruídos, distorções e perda de dados (ANDERSON & GASTON, 2013; LUCIEER *et al.*, 2014). Além disso, a incidência solar excessiva ou a presença de sombras

densas em áreas vegetadas interferem na calibração radiométrica e na consistência dos mosaicos fotogramétricos.

A questão legal também constitui uma barreira importante para o avanço das aplicações ambientais de drones. No Brasil, as operações com ARPs são regulamentadas pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), que estabelecem requisitos relacionados à segurança operacional, ao uso do espaço aéreo, à homologação dos equipamentos e às condições de voo. Para operações que envolvem aerolevantamentos, também é obrigatório o cadastro da atividade junto ao Ministério da Defesa (MD), por meio do Sistema de Cadastro de Levantamentos Aeroespaciais do Território Nacional (SISCLATEN), conforme a legislação vigente. Além disso, operações acima de 120 m de altura ou em condições específicas dependem de autorização do DECEA para utilização do espaço aéreo (ANAC, 2017; DECEA, 2026). Nesse contexto, destaca-se a Instrução do Comando da Aeronáutica ICA 100-40 (BRASIL, 2026), publicada pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), que estabelece os procedimentos para o acesso de sistemas de aeronaves não tripuladas ao espaço aéreo brasileiro. A ICA 100-40 define o aerolevantamento como o conjunto de operações aéreas destinadas à medição, computação e registro de dados do terreno por meio de sensores e equipamentos adequados, incluindo a interpretação e representação das informações obtidas. Tal definição engloba atividades amplamente empregadas em levantamentos fotogramétricos e LiDAR realizados com drones. A norma também conceitua a Aeronave Não Tripulada (UA) como qualquer aeronave destinada a operar sem piloto a bordo, enquanto o Sistema de Aeronave Não Tripulada (UAS) compreende a aeronave e todos os seus componentes associados, incluindo sistemas de controle e comunicação.

Sob a perspectiva operacional, a regulamentação distingue as operações conduzidas em Linha de Visada Visual (VLOS), nas quais o piloto ou observador mantém contato visual direto com a aeronave, das operações Além da Linha de Visada Visual (BVLOS), em que esse contato visual não é mantido. Essa diferenciação influencia diretamente os requisitos operacionais e o processo de autorização de voo. A norma também estabelece uma classificação baseada no risco da operação, dividindo-as nas categorias Aberta, Específica e Certificada. As operações enquadradas na categoria Aberta são limitadas a aeronaves com Peso Máximo de Decolagem (PMD) igual ou inferior a 25 kg, realizadas em VLOS, até 120 m de altura e sem interseção com áreas de restrição de voo. Operações que não atendem a esses critérios passam a ser enquadradas na categoria Específica, enquanto operações de maior

complexidade podem ser classificadas como Certificadas. Para que uma operação possa acessar o espaço aéreo brasileiro, a ICA 100-40 prevê a emissão da Autorização SARPAS, documento expedido pelo DECEA com a finalidade de garantir a manutenção da segurança da navegação aérea e a adequada integração das aeronaves não tripuladas ao espaço aéreo nacional.

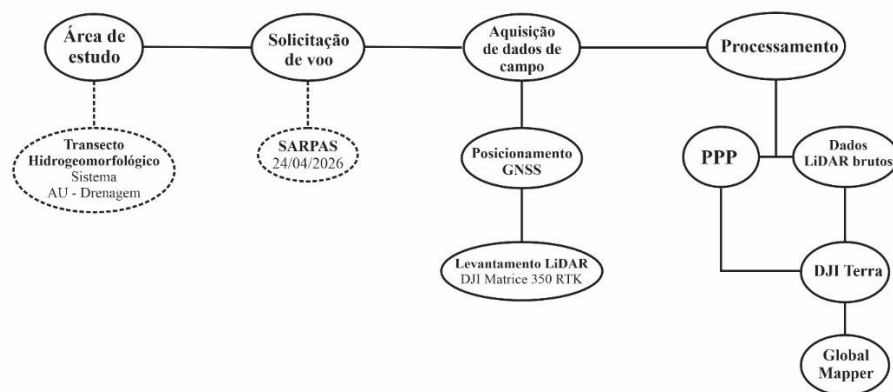
Há ainda aspectos éticos e de segurança a serem considerados. O sobrevoo de áreas urbanas ou de locais de fauna sensível requer cuidados adicionais para evitar perturbações ambientais e conflitos com comunidades locais (HOEK SPAANS *et al.*, 2024). Em ambientes naturais ou de semi-cativeiro, há estudos de interferências na fauna aviária (patos-reais; flamingos selvagens e maçaricos-de-bico-verde), que visam entender as reações relacionadas à presença dos drones (VAS *et al.*, 2015).

No Brasil, o uso de drones cresceu significativamente nos últimos anos. Segundo a ANAC, mais de 1,2 milhões de drones estavam registrados em 2025. Em aviação agrícola, o número de drones para pulverização saltou de apenas 355 em 2021 para cerca de 7.832 em 2024 (SINDAG). Esse crescimento tecnológico abre oportunidades para aplicação de mapeamento suborbital em ecossistemas menos estudados, como as áreas úmidas do Sudeste brasileiro. Contudo, ainda há carência de padronização metodológica e de capacitação técnica em muitos grupos de pesquisa e em órgãos reguladores e fiscalizadores, o que pode gerar inconsistências entre estudos e dificultar comparações espaciais e temporais.

3. MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia adotada neste trabalho foi estruturada em etapas sequenciais que contemplaram o planejamento, a aquisição e o processamento dos dados geoespaciais (Figura 7). Inicialmente, foi definida a área de estudo correspondente ao transecto hidrogeomorfológico, seguida da solicitação de autorização de voo por meio do Sistema de Solicitação de Acesso ao Espaço Aéreo por Aeronaves Não Tripuladas (SARPAS). Na etapa de campo, realizou-se o posicionamento de uma base GNSS para apoio ao georreferenciamento dos dados, seguido do levantamento aéreo com a plataforma DJI Matrice 350 RTK equipada com sensor LiDAR nativo. Posteriormente, os dados GNSS foram submetidos ao serviço IBGE-PPP para refinamento das coordenadas, enquanto os dados LiDAR brutos foram pré-processados no *software* DJI Terra, para serem pós-processados no *software* Global Mapper.

Figura 7. Fluxo de trabalho seguido.



Após a definição da área de estudos, utilizada como base para o planejamento das atividades de campo e aquisição dos dados, foi realizada a solicitação de voo junto ao SARPAS, requerida para 24/04/2026, garantindo a regularização das operações aéreas.

A etapa de aquisição dos dados de campo ocorreu com o emprego de uma base RTK para correção e posicionamento geodésico de alta precisão, associada ao uso do drone DJI Matrice 350 RTK durante os levantamentos aerofotogramétricos. Em seguida, os dados passaram por processamento, iniciando-se pelo Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) da estação GNSS, realizado por meio do serviço online do IBGE, com o objetivo de determinar com elevada precisão as coordenadas da base utilizada durante o levantamento. Posteriormente, essas coordenadas foram empregadas no reproprocessamento dos dados cinemáticos adquiridos em modo RTK (*real-time kinematic*), resultando em um levantamento pós-processado (*post-processed kinematic* - PPK).

Os dados LiDAR brutos foram então processados no *software* DJI Terra para geração e estruturação da nuvem de pontos, sendo posteriormente exportados e submetidos às etapas de classificação, filtragem e análise espacial no *software* *Global Mapper*.

3.1 Aquisição de dados de campo

3.1.1 Levantamento GNSS

A atividade de campo iniciou-se com a implantação e configuração da base GNSS em modo RTK, posicionada em local estável e com boas condições de rastreamento dos satélites. Após sua estabilização e início da coleta contínua dos dados de posicionamento, foi respeitado um intervalo de 1h30 para garantir armazenamento dos dados necessário ao pós-processamento das coordenadas pelo serviço IBGE-PPP. Somente após esse período teve início a operação do drone para aquisição dos dados LiDAR. Durante todo o voo, a base permaneceu registrando dados simultaneamente ao sistema embarcado na aeronave, permitindo posteriormente a correção e o refinamento do posicionamento geoespacial dos produtos gerados. Esse procedimento contribuiu para aumentar a precisão altimétrica e planimétrica da nuvem de pontos e dos modelos digitais obtidos ao longo do levantamento.

A coleta foi realizada com a plataforma GNSS DJI D-RTK 2 (Figura 8), operando em modo estático, permitindo o rastreamento contínuo de sinais de múltiplas constelações. Os dados brutos coletados foram posteriormente convertidos para o formato padrão RINEX.

Figura 8. Estação móvel de alta precisão DJI D-RTK 2.

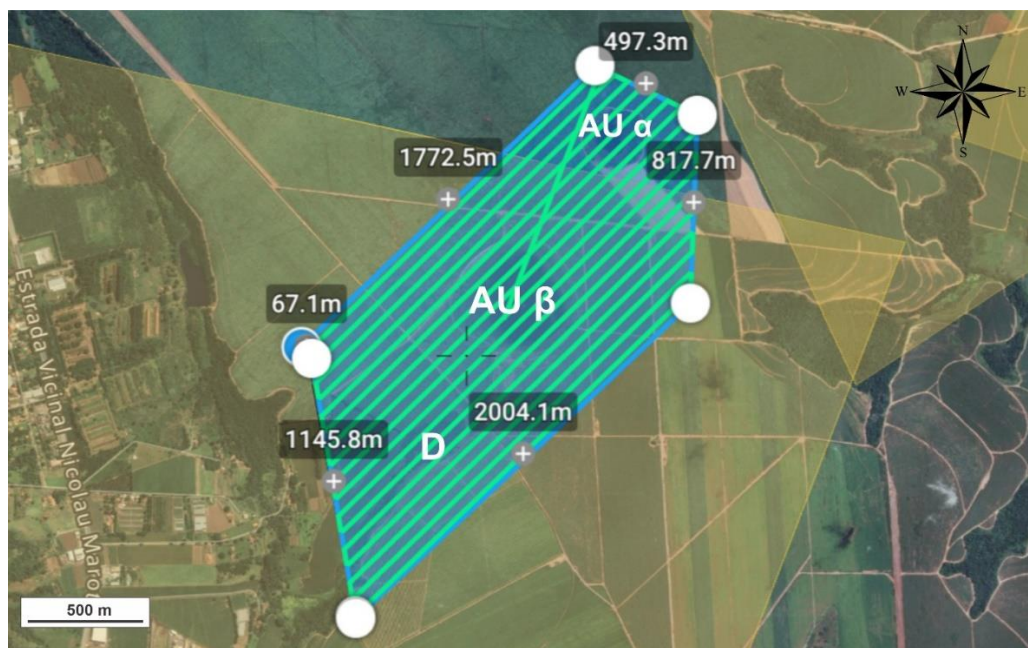


3.1.2 Aquisição de dados LiDAR

O levantamento aerotransportado foi realizado em 24 de abril de 2026, com início às 8h00, utilizando uma aeronave remotamente pilotada DJI Matrice 350 RTK equipada com

sensor LiDAR e câmera RGB integrada. O planejamento da missão foi elaborado por meio do aplicativo nativo da plataforma (Figura 9), no qual foram definidos os parâmetros operacionais necessários para garantir a cobertura integral da área de estudo, a adequada sobreposição entre as faixas de aquisição e a obtenção de dados com qualidade geométrica compatível com os objetivos do levantamento. O plano de voo foi elaborado de forma a contemplar, em uma única missão contínua, as duas áreas úmidas estudadas (AU α e AU β), a drenagem associada e suas respectivas áreas de contribuição hídrica superficial direta. Essa configuração permitiu a aquisição integrada dos diferentes compartimentos do sistema hidrogeomorfológico, garantindo cobertura espacial contínua e adequada sobreposição dos dados. Dessa forma, tornou-se possível analisar não apenas as características individuais de cada área úmida, mas também suas relações espaciais, potenciais conexões hidrológicas e a organização da paisagem ao longo do transecto investigado.

Figura 9. Captura de tela do controle do drone, com o polígono de aquisição demarcado durante o planejamento do voo.



A missão foi executada a uma altitude operacional de 110 m em relação ao terreno e velocidade média de 12,8 m s⁻¹, percorrendo aproximadamente 37,42 km ao longo de 55 minutos de voo. Durante toda a operação, foi realizada a calibração contínua da Unidade de Medição Inercial (IMU), enquanto o sistema RTK embarcado forneceu informações de posicionamento de alta precisão para o georreferenciamento direto dos dados. O levantamento contemplou uma área de aproximadamente 2,12 km², resultando na aquisição automática de 880 fotografias georreferenciadas e em um *Ground Sample Distance* (GSD) de 3 cm pixel⁻¹, proporcionando elevado nível de detalhamento espacial para os produtos derivados.

Para a aquisição dos dados LiDAR, o sensor foi configurado no modo de escaneamento repetitivo (*repetitive scanning*), com taxa de amostragem de 240 kHz e capacidade de múltiplos retornos do tipo “*penta return*”, permitindo o registro de até cinco retornos para cada pulso emitido. Essa configuração favorece a caracterização de superfícies complexas e áreas com cobertura vegetal, possibilitando a obtenção de informações provenientes de diferentes estratos da vegetação e da superfície do terreno. Adicionalmente, foi adotada uma sobreposição de 50% entre as faixas de varredura LiDAR, condição que resultou em aproximadamente 60% de sobreposição das imagens RGB adquiridas simultaneamente, contribuindo para uma cobertura homogênea da área e para a colorização da nuvem de pontos gerada posteriormente.

3.2 Processamento dos dados de campo

3.2.1 Dados GNSS

O processamento dos dados GNSS foi realizado por meio do serviço online IBGE-PPP (IBGE, 2026), que emprega a técnica de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) para determinar, com elevada precisão, as coordenadas da estação base utilizada durante o levantamento. As coordenadas obtidas foram posteriormente empregadas no reproprocessamento dos dados cinemáticos adquiridos em modo RTK, possibilitando o refinamento do georreferenciamento da nuvem de pontos LiDAR por meio de um levantamento PPK.

Na etapa de preparação, procedeu-se à verificação da consistência dos arquivos, incluindo informações de cabeçalho, como tipo de antena, altura da antena e intervalo de coleta, assegurando a integridade dos dados antes da submissão. Os arquivos em formato RINEX foram então inseridos na plataforma IBGE-PPP, juntamente com os parâmetros complementares necessários ao processamento, incluindo as especificações da antena e sua altura em relação ao ponto levantado, além da definição do sistema de referência geodésico adotado.

O processamento foi executado automaticamente pelo serviço, com base em órbitas e relógios precisos dos satélites, bem como na aplicação de modelos de correção para efeitos atmosféricos (ionosféricos e troposféricos), além de ajustes associados a efeitos geofísicos e relativísticos. A técnica de PPP possibilitou a estimativa da posição absoluta do ponto, realizando o ajustamento das observações, a identificação de inconsistências e a avaliação da qualidade da solução obtida.

Como resultado, foram geradas coordenadas geodésicas e cartesianas no sistema SIRGAS, acompanhadas de seus respectivos indicadores de precisão, como desvios padrão e parâmetros associados ao tempo de convergência da solução.

3.2.2 Dados LiDAR brutos

O processamento dos dados LiDAR foi conduzido no *software* DJI Terra de forma sequencial, compreendendo as etapas descritas a seguir.

Inicialmente, realizou-se a importação dos dados brutos, incluindo os arquivos LiDAR e os dados de navegação associados (coordenadas absolutas do ponto – subseção 4.1), bem como os parâmetros de calibração do sensor. Nessa etapa, o *software* organiza e indexa os dados, preparando-os para o processamento subsequente.

Em seguida, procedeu-se ao processamento da trajetória do sensor, a partir da integração dos dados GNSS e das medições inerciais (IMU). Esse processo resultou na determinação da posição e orientação do sistema ao longo do tempo, fornecendo uma solução de trajetória contínua e precisa.

Na etapa posterior, foi realizada a sincronização temporal entre os dados brutos e a trajetória calculada, permitindo associar cada pulso emitido pelo sensor a um instante específico e, conseqüentemente, à posição e orientação correspondentes do sistema de aquisição.

Com base nessa integração, executou-se o georreferenciamento direto dos retornos LiDAR, no qual as distâncias medidas pelo sensor foram convertidas em coordenadas tridimensionais no espaço, considerando os parâmetros de posicionamento e atitude previamente determinados.

Por fim, foi realizada a geração da nuvem de pontos tridimensional, resultando em um conjunto denso de pontos georreferenciados, contendo atributos como coordenadas espaciais (X, Y, Z) e intensidade do retorno. Essa nuvem de pontos constitui o produto primário do processamento no DJI Terra e serviu como base para as etapas subseqüentes de classificação e análise em ambiente externo.

Após a geração da nuvem de pontos, procede-se à etapa de exportação dos dados, na qual o produto é convertido para formatos compatíveis com softwares de processamento e análise externos. A nuvem de pontos é exportada, preferencialmente, nos formatos LAS (.las) ou LAZ (.laz), amplamente reconhecidos como padrão para armazenamento de dados LiDAR. O formato LAS, estabelecido pela *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*

(2013), permite o armazenamento estruturado de grandes volumes de pontos tridimensionais com atributos associados, enquanto o formato LAZ corresponde à sua versão comprimida, mantendo integralmente as informações com redução do tamanho do arquivo.

Os arquivos exportados contêm, para cada ponto, atributos fundamentais, como coordenadas tridimensionais (X, Y, Z), intensidade do retorno, número de retornos e informações temporais, além de metadados relacionados ao sistema de coordenadas, fatores de escala e offsets, garantindo a correta interpretação espacial dos dados.

3.2.3 Dados LiDAR pós-processados

No *software Global Mapper v.25.1*, o arquivo .LAS foi importado via “*Open Data File*”, em seguida acessou-se “*Lidar Analysis*” e, na opção “*Automatic Point Cloud Analysis*”, foram ajustados os parâmetros de classificação de vegetação: altura mínima de 0 m, média de 2,5 m e máxima de 5,5 m, definidos baseados nas observações de campo (vegetação rasteira, pasto, agricultura e mata ciliar). Após o processamento, obteve-se a nuvem de pontos classificada, também em formato .LAS, selecionada a opção “*Color Lidar by Classification*”, foi gerado um perfil topográfico utilizando a ferramenta “*Path Profile*”, que exibe um perfil vertical ao longo de um caminho estabelecido usando os dados de elevação carregados. Ademais a classificação pela vegetação, foi gerada também uma grade de elevação a partir da ferramenta “*Create Elevation Grid*”, utilizando os dados LiDAR classificados em formato .LAS (considera-se esta grade de elevação como o modelo digital). Para a geração do modelo digital de superfície (MDS) todos os pontos classificados foram usados (visto que a superfície contempla tanto terreno, quanto vegetação existente), já para o modelo digital de terreno (MDT), apenas os pontos classificados como “terreno” (“*ground*”) foram utilizados. Ambos os modelos foram gerados com uma resolução espacial de 1 metro.

Em seguida, foi criada uma feição vetorial de área (*Create Area Feature*) correspondente ao limite de cada área úmida, delimitada com o auxílio da ferramenta *Digitizer Tool*. Essa feição foi utilizada como referência espacial para a etapa de análise volumétrica.

Posteriormente, por meio da ferramenta *Calculate Flattened Site Plan Grid*, disponível no menu *Advanced Feature Creation Options*, foi gerada uma superfície planificada sobre a área delimitada. Essa superfície representa um plano de referência correspondente ao fechamento hipotético da depressão, sendo utilizada como base para a estimativa do volume potencial de armazenamento. Como as bordas das áreas úmidas apresentam pequenas variações altimétricas, a superfície foi definida a partir da média das cotas obtidas em quatro pontos

distribuídos ao longo do perímetro da feição, resultando em uma cota de referência representativa para toda a depressão.

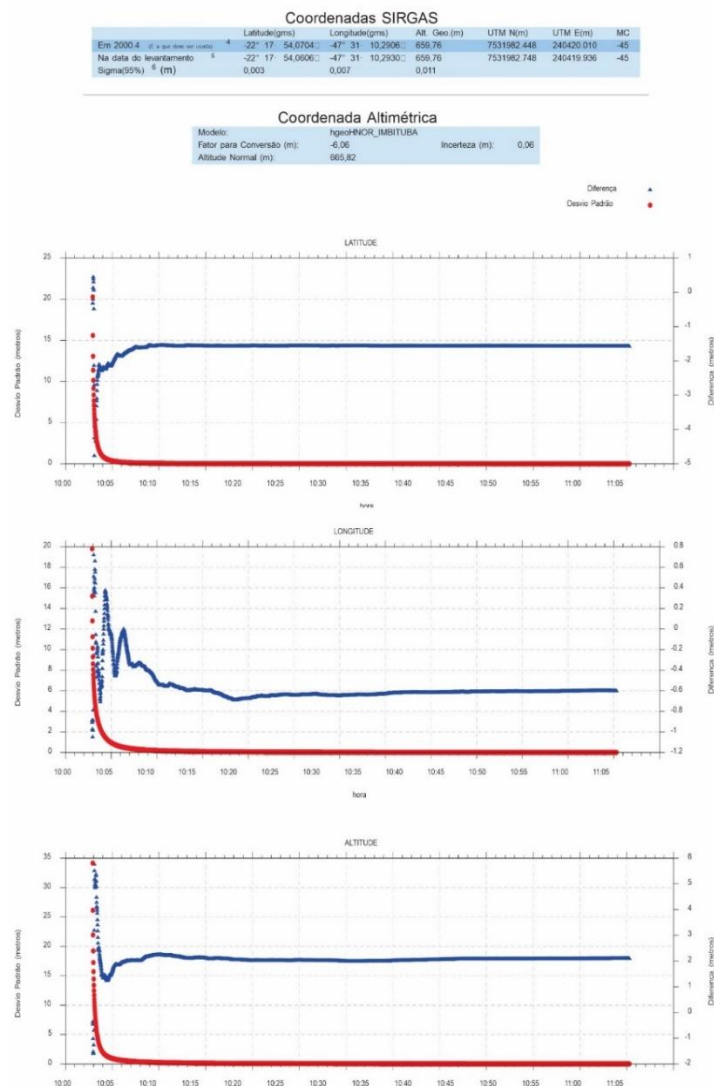
A partir dessa superfície, foi aplicada a análise de corte e aterro (*cut-fill*). Nessa adaptação metodológica, o volume compreendido entre a superfície planificada e o Modelo Digital do Terreno (MDT) corresponde ao volume interno da depressão. Assim, a porção classificada como *fill* representa o volume potencial de armazenamento hídrico da área úmida, enquanto as áreas localizadas acima da superfície de referência correspondem às bordas da depressão. Dessa forma, a metodologia permitiu estimar, de maneira padronizada, o potencial volumétrico das áreas úmidas a partir de sua geometria e configuração topográfica.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Nuvem de Pontos LiDAR com Correção RTK

Com base no relatório estatístico (Figura 10) gerado pelo IBGE-PPP, o rastreo GNSS realizado em modo estático durante aproximadamente 57 minutos apresentou resultados compatíveis com levantamentos de alta precisão, fornecendo coordenadas confiáveis para a materialização da estação base utilizada no projeto. O processamento foi executado com observações de código e fase, utilizando órbitas finais dos satélites e processamento na frequência L3, resultando em uma solução estável e consistente.

Figura 10. Estatísticas do processamento de ponto preciso para a base GNSS gerada e utilizada ao longo do projeto. IBGE, 2026.



As coordenadas oficiais no sistema SIRGAS2000 (época 2000.4), adotadas como referência para este trabalho, corresponderam à latitude 22°17'54,0704" S, longitude

47°31'10,2906" W e altitude geométrica de 659,76 m. Em coordenadas UTM, o ponto foi posicionado em 7.531.982,448 m N e 240.420,010 m E, no meridiano central de 45°W. Os indicadores de precisão apresentaram valores de sigma (95%) de 0,003 m para a latitude, 0,007 m para a longitude e 0,011 m para a altitude geométrica, evidenciando incertezas centimétricas e a elevada confiabilidade da solução obtida.

A análise da curva de estabilidade demonstra que as componentes de latitude e longitude apresentaram rápida convergência, atingindo estabilidade aproximadamente às 10h10. A partir desse horário, os valores permaneceram praticamente constantes durante o restante da sessão de rastreamento, com pequenas oscilações residuais na longitude até cerca de 10h20, quando a solução se estabilizou definitivamente. Esse comportamento confirma que o tempo de observação adotado foi suficiente para garantir uma solução PPP estável e adequada para o georreferenciamento da estação base utilizada nos levantamentos.

Em relação ao componente vertical, o processamento permitiu a determinação de uma altitude normal de 665,82 m, calculada a partir do modelo geoidal `hgeoHNOR_IMBITUBA`, com incerteza estimada de 0,06 m. Os gráficos de convergência apresentados no relatório evidenciam ainda a redução progressiva dos desvios-padrão ao longo da sessão, corroborando a qualidade e a confiabilidade das coordenadas finais adotadas como referência espacial para as etapas subsequentes do trabalho.

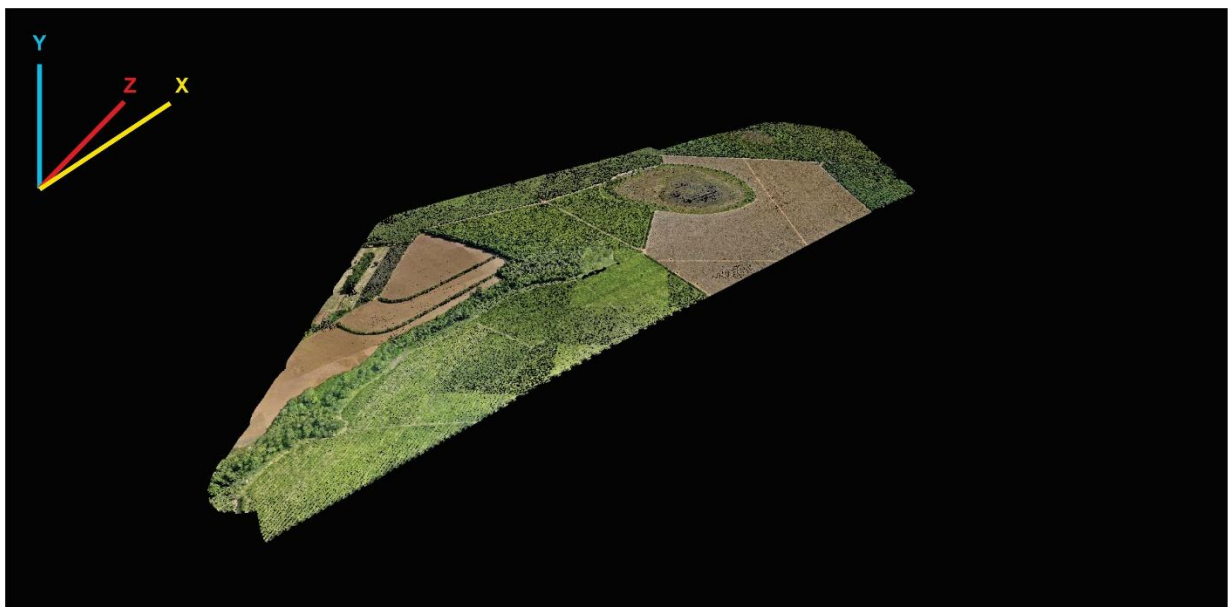
Após o processamento dos dados LiDAR e a aplicação das correções de posicionamento via RTK, foi gerada uma nuvem de pontos composta por 46.927.353 pontos, correspondendo a uma densidade média de 23.737 pontos m². A nuvem apresenta amplitude altimétrica entre 624,384 m e 766,056 m, refletindo a variabilidade topográfica do sistema hidrogeomorfológico investigado. Os dados podem ser visualizados, classificados e interpretados por diferentes métodos de representação, conforme exemplificado na Figura 11.

Figura 11. Visualização da nuvem de pontos em “Color Lidar by RGB/Elev”.



Por se uma área de relevo suavizado, a visualização em 3D não se torna muito efetiva, uma vez que o estudo foca no terreno em si, e não necessariamente nas variações de altura de vegetação existentes, mas é importante ressaltar que o *software* permite esta ambientação, sobretudo para ajustes na classificação dos elementos de superfície (Figura 12).

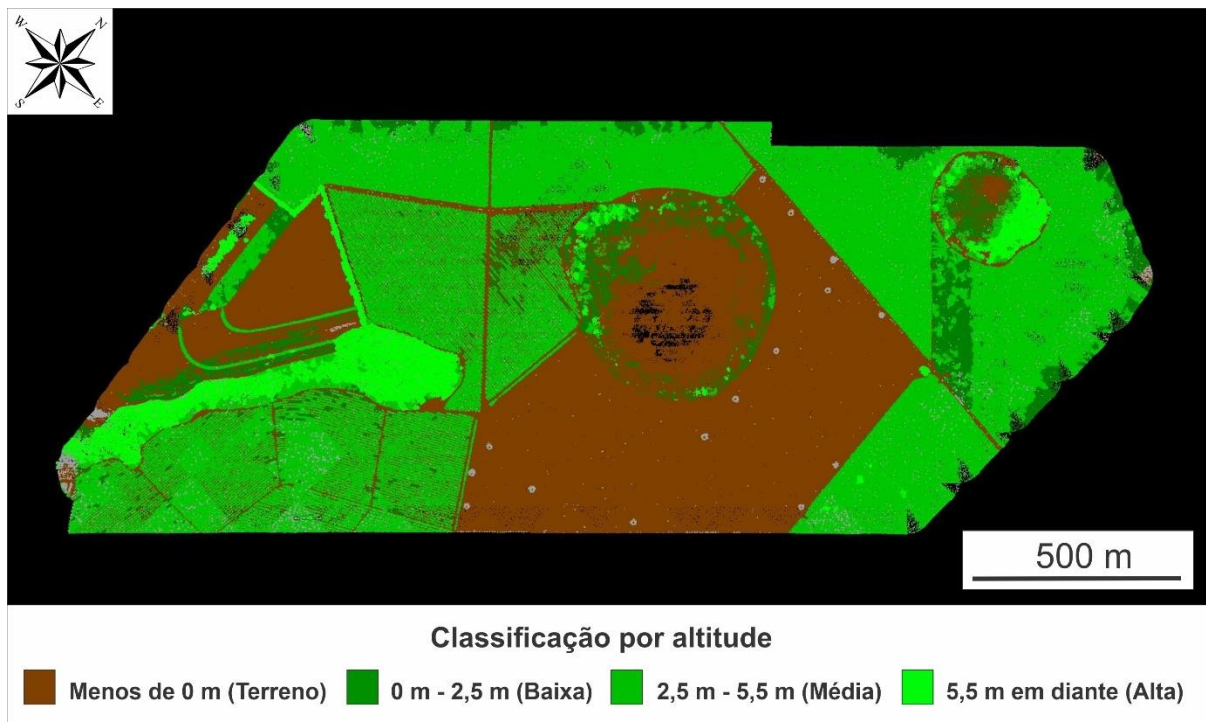
Figura 12. Visualização, em perspectiva, da nuvem de pontos em “Color Lidar by RGB/Elev”.



Além da visualização da nuvem em RGB visível, ela também pode ser analisada sob a ótica da classificação da vegetação (“Color Lidar by Classification”). A representação em planta (Figura 13) evidencia a distribuição espacial das diferentes classes de cobertura presentes na área estudada, permitindo a distinção entre vegetação baixa, média e alta, além das

superfícies classificadas como terreno. A classificação foi realizada com base em parâmetros de altura previamente definidos, nos quais a vegetação baixa, compreendida entre 0 e 2,5 m, foi representada em verde escuro; a vegetação média, entre 2,5 e 5,5 m, em tonalidade intermediária de verde; e a vegetação alta, acima de 5,5 m, em verde claro. As áreas classificadas como terreno, ou pontos abaixo do limite altimétrico estabelecido, foram representadas em marrom.

Figura 13. Visualização da nuvem de pontos em "*Color Lidar by Classification*".



O modelo permitiu identificar diferentes padrões de uso e ocupação da área, evidenciando feições associadas a drenagens, áreas úmidas, estradas, talhões agrícolas e diferentes densidades de cobertura vegetal. Observa-se que as regiões com vegetação mais elevada se concentram principalmente em áreas de preservação e proximidades de drenagens, enquanto as áreas agrícolas apresentam predominância de vegetação média e baixa, associadas às diferentes culturas presentes no local (citricultura e cana-de-açúcar).

A partir da nuvem de pontos classificada, obtiveram-se dois tipos de modelos digitais. O MDS (Figura 14), que se utilizou da classificação completa, e o MDT (Figura 15), gerado apenas com os pontos classificados como “*ground*”.

Figura 14. A) Visualização em perspectiva do MDS. B) Visualização em planta do MDS. C) MDS com escala de altitude.

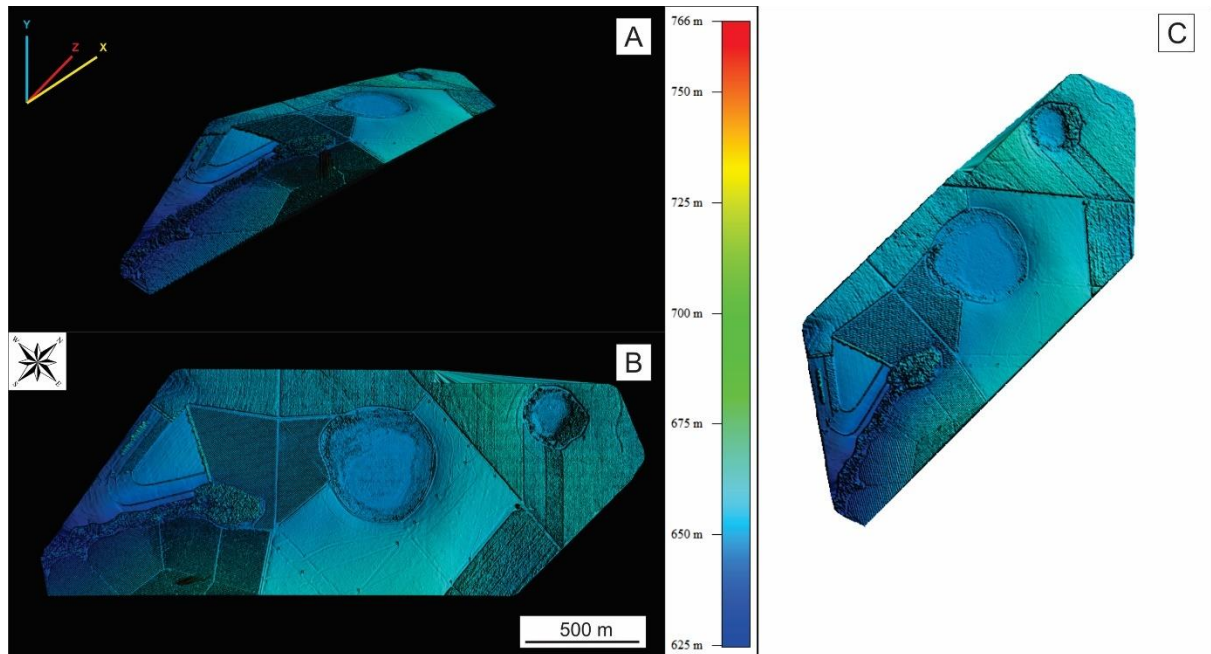
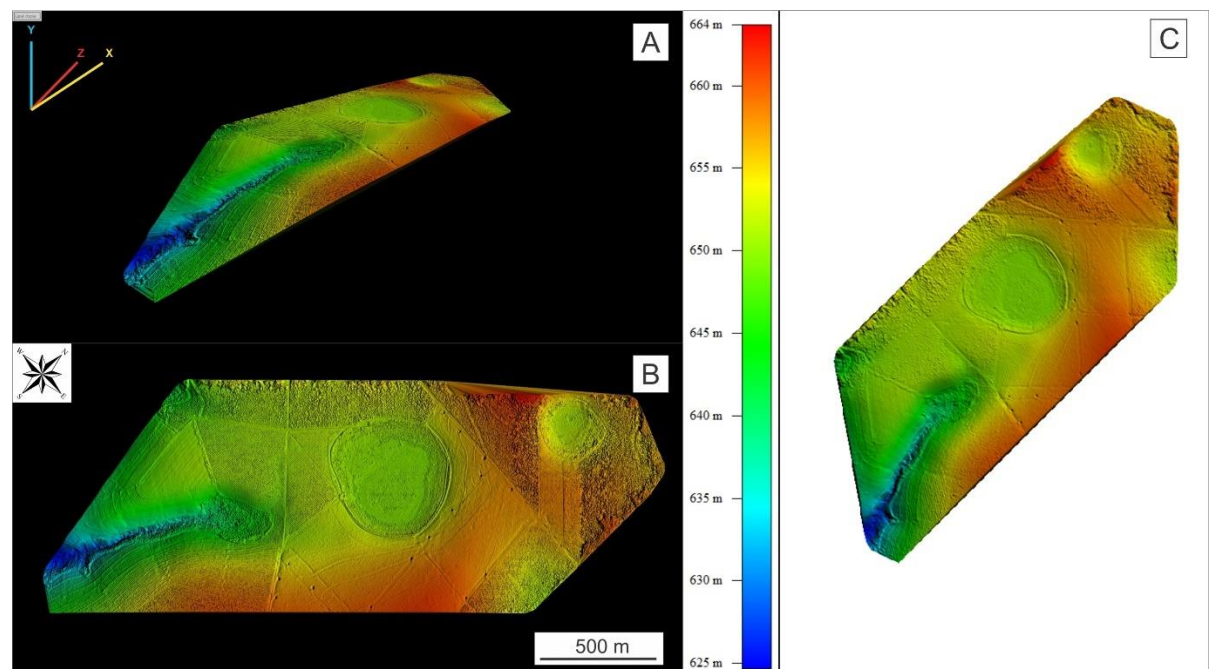


Figura 15. A) Visualização em perspectiva do MDT. B) Visualização em planta do MDT. C) MDT com escala de altitude.

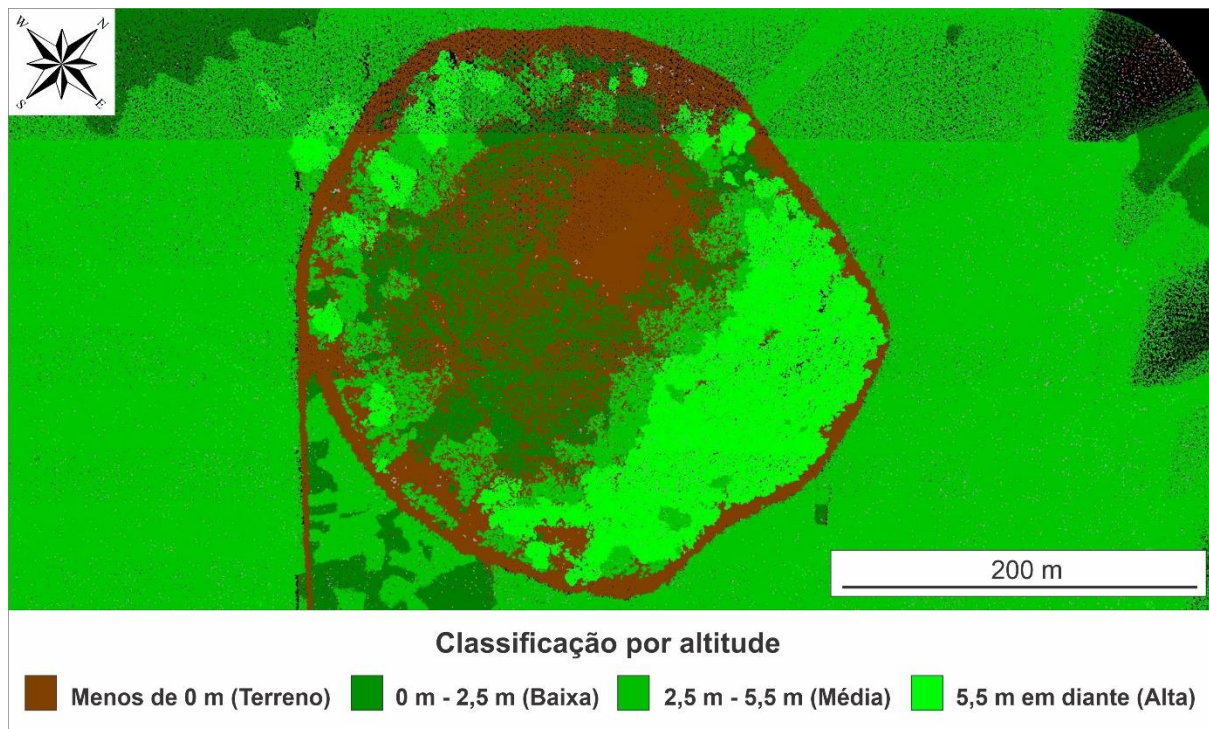


4.2 Caracterização Hidrogeomorfológica da Área Úmida Alfa (AU α).

Na análise isolada das estruturas presente no sistema, a AU α apresenta um predomínio de vegetação de altura média, representada em verde intermediário, já a presença de pontos marrons, que indicam solo exposto, sugere que a vegetação está mais baixa e esparsa (Figura 16). Por não haver pontos de não-retorno do LiDAR, pode-se inferir que a feição não apresenta

água superficial, sendo caracterizada assim como uma área úmida temporária, passando por hidroperíodos de seca e enchimento completo.

Figura 16. Visualização em "Color Lidar by Classification" da AU α .



Para o cálculo de potencial de armazenamento hídrico, a superfície de referência (estabelecida em função da técnica de "corte-aterro" utilizada) foi gerada na cota média de 655,67 m. O *software* dispõe de 6 tipos de resultados para a área selecionada, sendo eles: *Cut Volume*; *Cut 2D Surface Area*; *Cut 3D Surface Area*; *Fill Volume*; *Fill 2D Surface Area* e *Fill 3D Surface Area*. Este estudo contempla os valores de "Fill volume", que corresponde ao armazenamento hídrico potencial da AU, e do "Fill 2D Surface" que corresponde a área em m² da mesma. Uma vez que o MDS e o MDT representam diferentes compartimentos da superfície terrestre, a compartimentação morfométrica e o potencial de armazenamento hídrico da AU α foram calculados em ambos os modelos (Tabela 1). O MDT representa a geometria da depressão após a remoção dos elementos superficiais, fornecendo uma estimativa do volume máximo potencial de armazenamento controlado exclusivamente pela configuração topográfica do terreno, configuração esta que demonstra também a área real dela. Em contraste, o MDS incorpora a vegetação e demais elementos presentes na superfície, de modo que parte do espaço interno da depressão encontra-se ocupada por esses componentes. Consequentemente, os volumes calculados a partir do MDS correspondem à capacidade efetiva de armazenamento hídrico do sistema sob as condições atuais de ocupação superficial. As diferenças observadas entre os dois modelos permitem quantificar a influência da cobertura vegetal na redução do

volume disponível para o acúmulo de água e oferecem uma interpretação mais realista da dinâmica hidrogeomorfológica da área úmida.

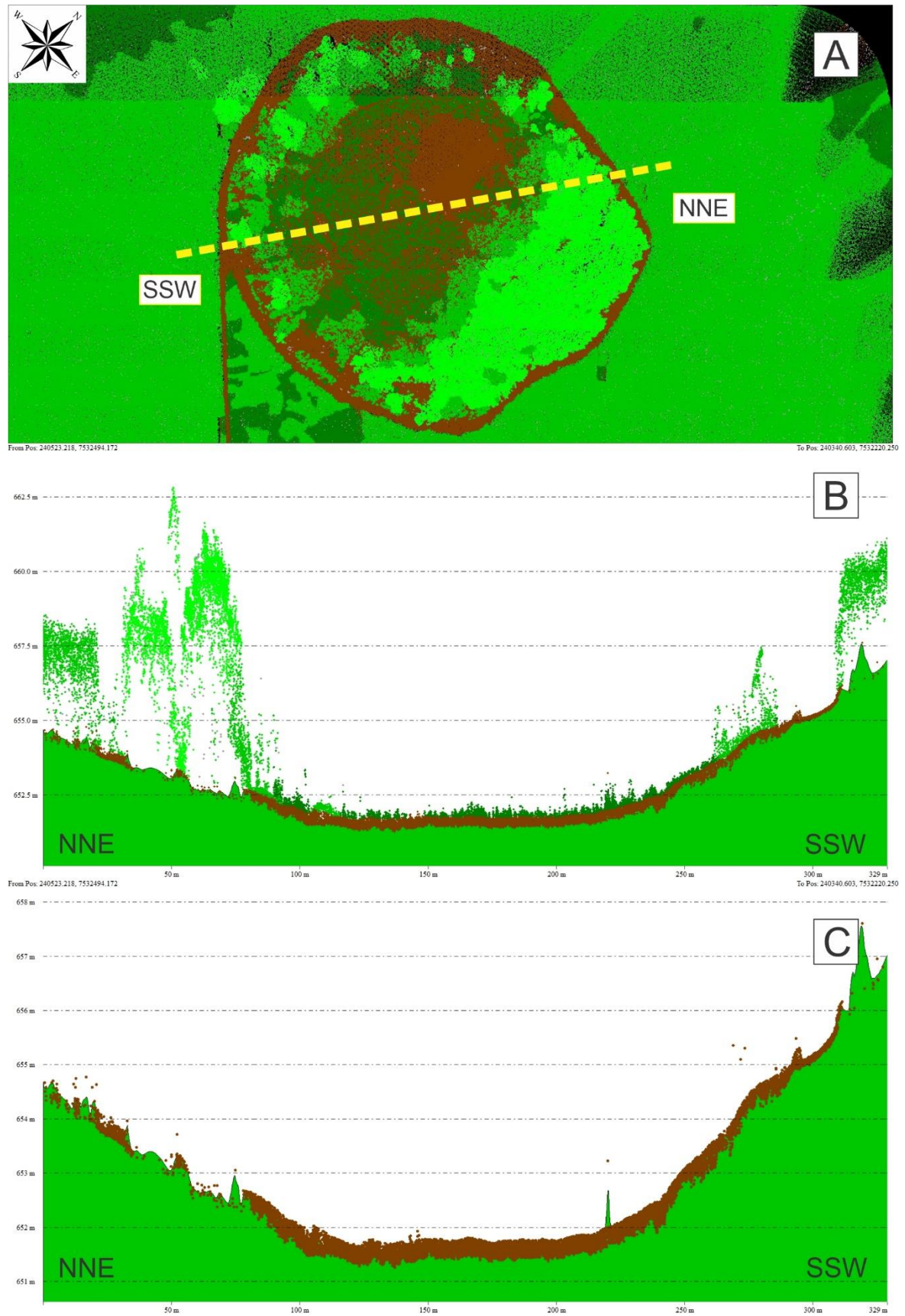
Vale ressaltar que, ao incorporar a vegetação aos cálculos, o polígono se readapta ao modelo em questão, e acaba não computando os valores de preenchimento relativos a vegetações que excedem a cota de referência estabelecida (o polígono passa a ter espaços vazios), resultando em valores de área menores entre os modelos.

Tabela 1. Potencial de armazenamento hídrico para a AU α nos modelos digitais.

Parâmetro	MDS	MDT
Volume (m ³)	103.599,58	150.263,01
Área (m ²)	37.730,00	55.000,00

Os resultados evidenciam uma redução expressiva no volume potencial de armazenamento entre os dois cenários analisados. Considerando apenas os pontos classificados como solo, foi estimado um volume de aproximadamente 150 mil m³. Já a incorporação dos elementos superficiais resultou em um volume de aproximadamente 104 mil m³, correspondendo a uma redução de cerca de 46 mil m³, ou aproximadamente 31% da capacidade inicialmente estimada. Essa diferença demonstra que a cobertura vegetal exerce influência significativa na compartimentação interna da área úmida, alterando a disponibilidade volumétrica do sistema. As seções topográficas derivadas dos modelos (Figura 17) evidenciam que a distribuição espacial da vegetação não ocorre de forma homogênea no interior da depressão, promovendo variações locais na capacidade de armazenamento e reforçando a importância da consideração dos elementos superficiais em análises hidrogeomorfológicas de alta resolução.

Figura 17. A) Direção do perfil traçado na AU α . B) Perfil topográfico no MDS. C) Perfil topográfico no MDT.

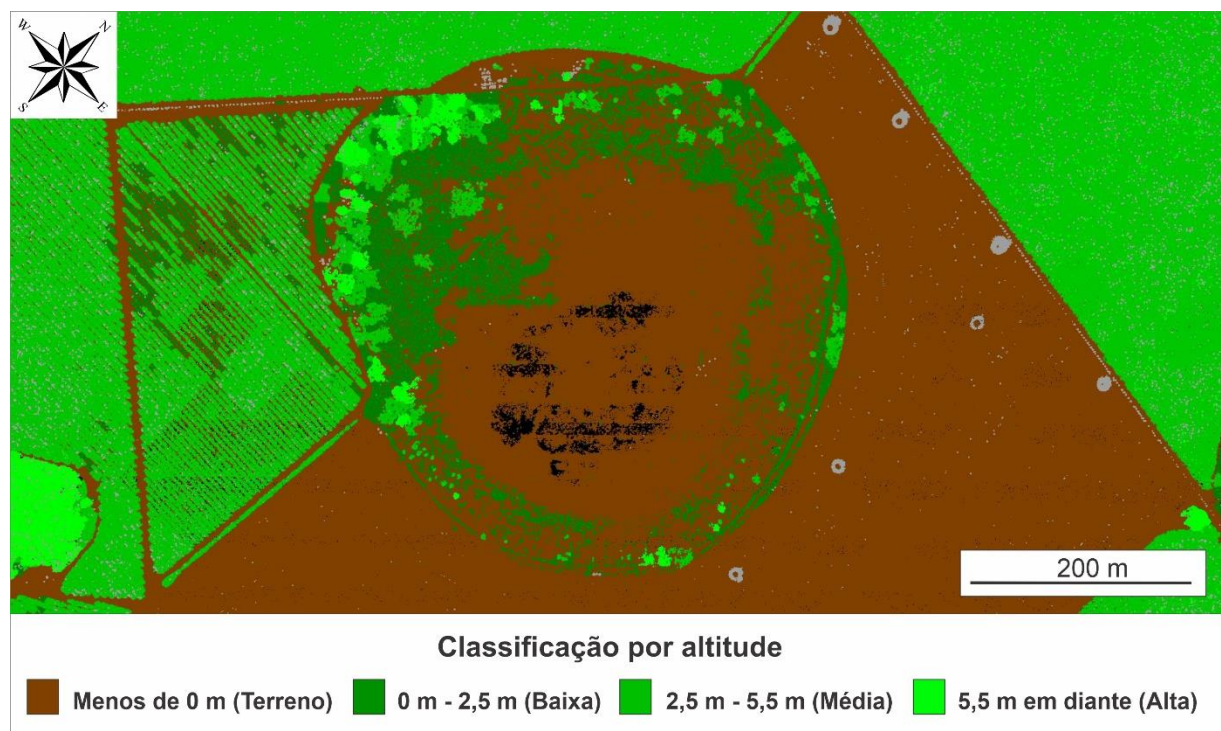


Sob o ponto de vista hidrogeomorfológico, os resultados demonstram que a estrutura superficial da área úmida desempenha papel importante na definição de sua capacidade efetiva de armazenamento. A expressiva redução volumétrica observada entre os cenários analisados evidencia que a vegetação não atua apenas como elemento ecológico da paisagem, mas também como componente físico capaz de modificar a geometria do espaço potencialmente inundável. Esse comportamento reforça a necessidade de abordagens que integrem relevo e cobertura superficial em avaliações hidrológicas de alta resolução, sobretudo em ambientes úmidos caracterizados por elevada densidade e heterogeneidade da vegetação.

4.3 Caracterização Hidrogeomorfológica da Área Úmida Beta (AU β).

Na análise isolada das estruturas presente no sistema, a AU β apresenta um predomínio vegetação de altura baixa, representada em verde escuro, e de solo exposto, representada pela cor marrom, sugerindo uma vegetação esta mais baixa e esparsa. Além disso, em pontos onde há ausência de retorno do LiDAR, é possível inferir a presença de água, já que os feixes emitidos pelo sensor não rebatem em superfícies líquidas (Figura 18). Apesar da água superficial não ser confinada, sua presença caracteriza a feição como uma área úmida permanente, com constante presença de lâmina d'água, deriva de recarga através de fluxos superficiais.

Figura 18. Visualização em "Color Lidar by Classification" da AU β .



Para o cálculo de potencial de armazenamento hídrico, a superfície de referência foi gerada na cota média de 652,31 m. Este estudo contempla os valores de "Fill volume", que

corresponde ao armazenamento da AU, e do *'Fill 2D Surface'* que corresponde a área em m² da mesma. Desta forma, os modelos possuem os valores dispostos na tabela 2.

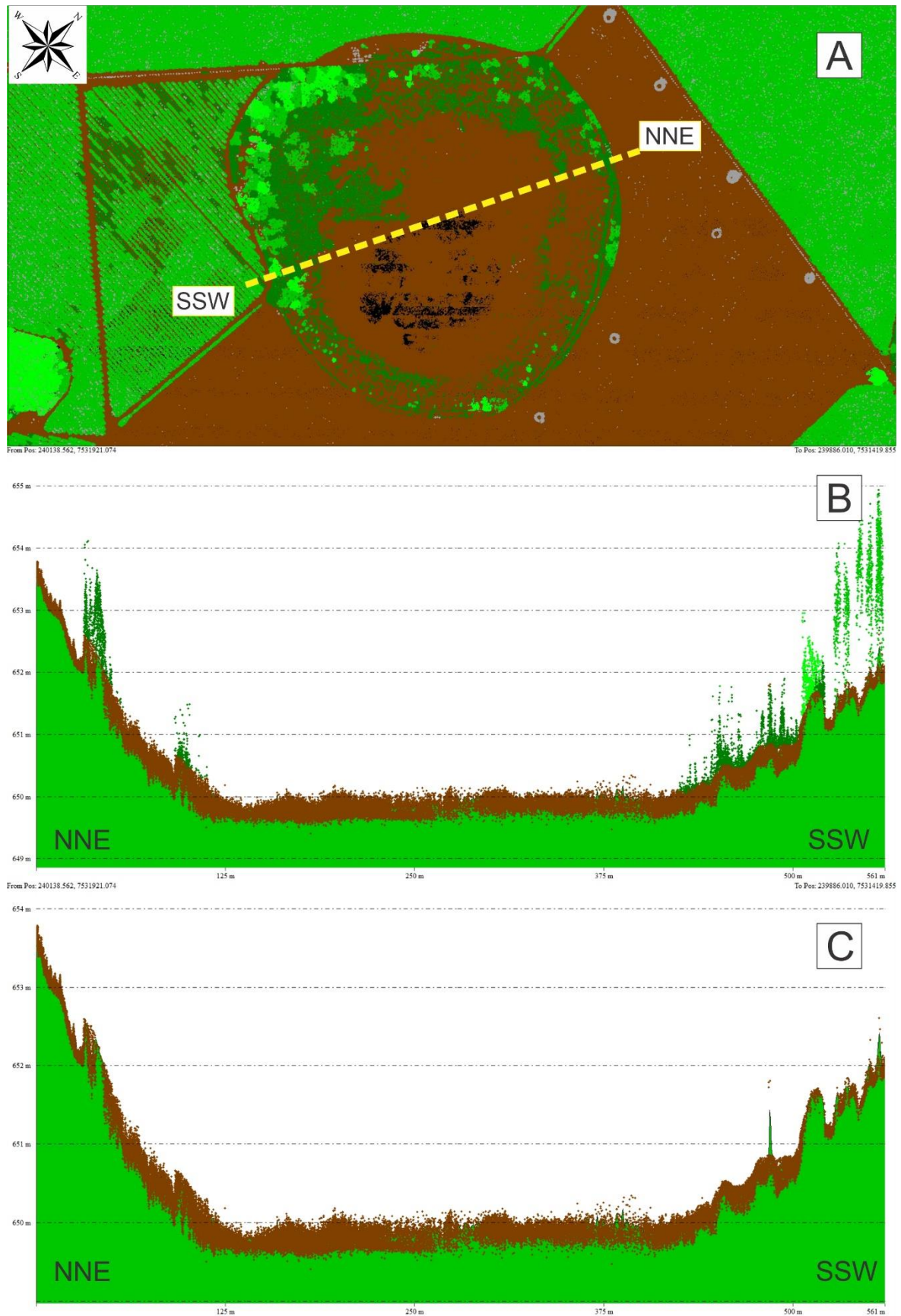
Tabela 2. Potencial de armazenamento hídrico para a AU **β** nos modelos digitais.

Parâmetro	MDS	MDT
Volume (m ³)	345.562,12	357.121,82
Área (m ²)	178.000,00	181.900,00

A AU **β** apresentou comportamento distinto daquele observado na AU **α**. Enquanto na AU **α** a presença da vegetação resultou em redução expressiva da capacidade potencial de armazenamento, na AU **β** as diferenças entre os modelos foram relativamente pequenas. O volume estimado variou de 357.121,82 m³ no MDT para 345.562,12 m³ no MDS, correspondendo a uma redução de aproximadamente 11.560 m³ (3,2%). De forma semelhante, a área delimitada apresentou redução de apenas 3.900 m² entre os modelos, passando de 181.900 m² para 178.000 m².

Esses resultados indicam que a cobertura vegetal exerce influência limitada sobre a geometria interna da depressão, ocupando apenas uma pequena parcela do espaço potencialmente disponível para o armazenamento hídrico. Os perfis topográficos (Figura 19) evidenciam que a vegetação se encontra distribuída de forma esparsa ou concentrada em setores específicos da feição, sem promover alterações significativas na configuração volumétrica do sistema.

Figura 19. A) Direção do perfil traçado na AU 8. B) Perfil topográfico no MDS. C) Perfil topográfico no MDT.



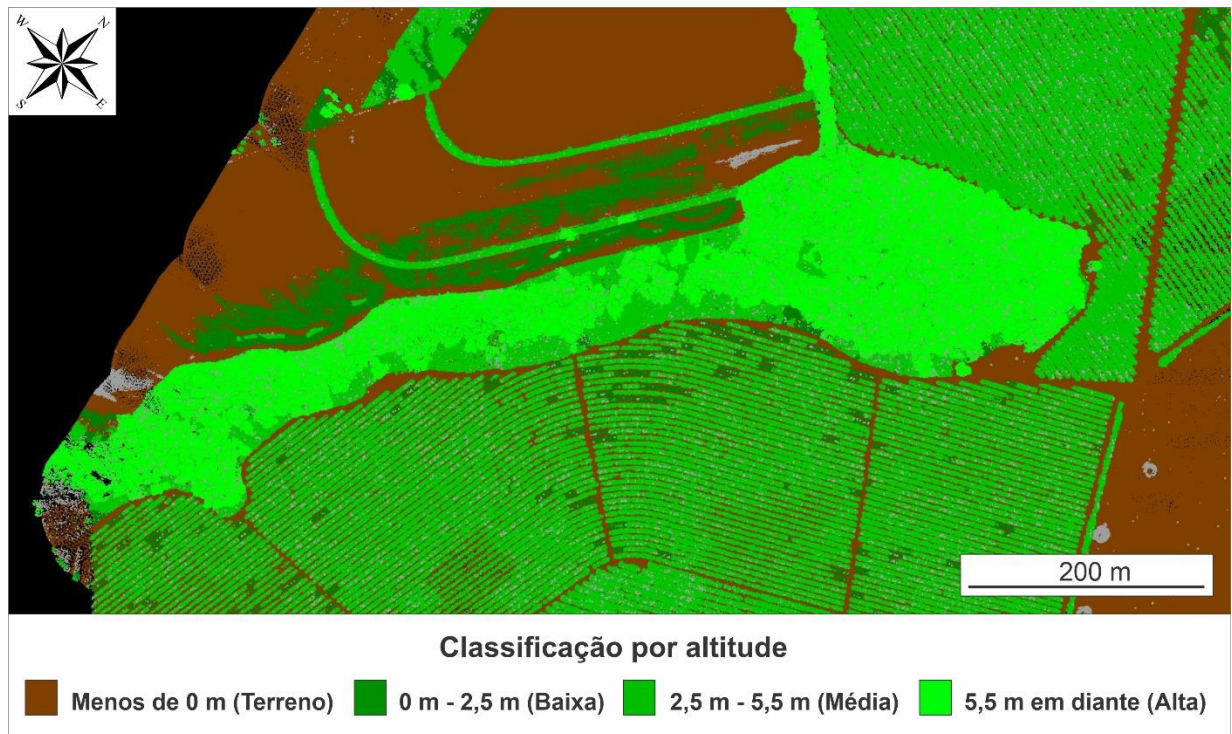
Sob a perspectiva hidrogeomorfológica, a proximidade entre os valores obtidos nos dois modelos sugere que a morfologia da depressão constitui o principal fator de controle da capacidade de armazenamento hídrico da AU β . Dessa forma, diferentemente da AU α , onde a estrutura vegetal influencia significativamente a estimativa volumétrica, a AU β apresenta comportamento mais próximo do potencial definido exclusivamente pelo relevo, indicando menor interferência dos elementos superficiais na organização do espaço potencialmente inundável.

4.4 Caracterização Hidrogeomorfológica da Drenagem Associada.

A drenagem associada às áreas úmidas constitui a feição terminal do transecto hidrogeomorfológico investigado. Sua ocorrência em cotas topográficas inferiores e sua proximidade espacial em relação às áreas úmidas indicam um possível papel na organização hidrológica da paisagem. Entretanto, as relações de conectividade e transferência de fluxos entre essas feições não foram diretamente avaliadas, devendo ser interpretadas apenas como potenciais conexões inferidas a partir da configuração topográfica observada.

Observa-se o predomínio de cobertura vegetal ao longo de toda a feição, com destaque para a classe de vegetação alta, representada em verde claro. A elevada densidade dessa cobertura dificulta a visualização do terreno em planta, evidenciando uma faixa contínua de vegetação associada à drenagem (Figura 20). Esse padrão sugere reduzida exposição superficial do solo ao longo do canal e indica que a vegetação constitui um dos principais elementos estruturais da paisagem local, influenciando diretamente a configuração física observada na nuvem de pontos.

Figura 20. Visualização em "Color Lidar by Classification" da drenagem.



Além da análise da cobertura vegetal, realizada a partir da classificação altimétrica dos retornos LiDAR, a caracterização hidrogeomorfológica da drenagem foi complementada pela interpretação dos perfis topográficos extraídos dos modelos digitais, permitindo avaliar as variações morfológicas ao longo de seu percurso. O perfil (Figura 21) obtidos evidencia um gradiente topográfico contínuo ao longo da feição, compatível com o padrão de declividade local e indicativo do sentido preferencial do escoamento superficial inferido para a área estudada. O perfil topográfico da cabeceira (Figura 22) evidencia uma feição deprimida e relativamente ampla, caracterizada por um fundo suavizado e margens com declividades moderadas. As cotas do terreno variam aproximadamente entre 641 m e 646 m, resultando em uma amplitude altimétrica próxima de 5 m. A geometria observada sugere uma zona de baixa energia hidrológica, favorável ao acúmulo temporário de água e à manutenção de condições de saturação do solo.

Figura 21. A) Direção do perfil traçado na drenagem. B) Perfil topográfico no MDS. C) Perfil topográfico no MDT.

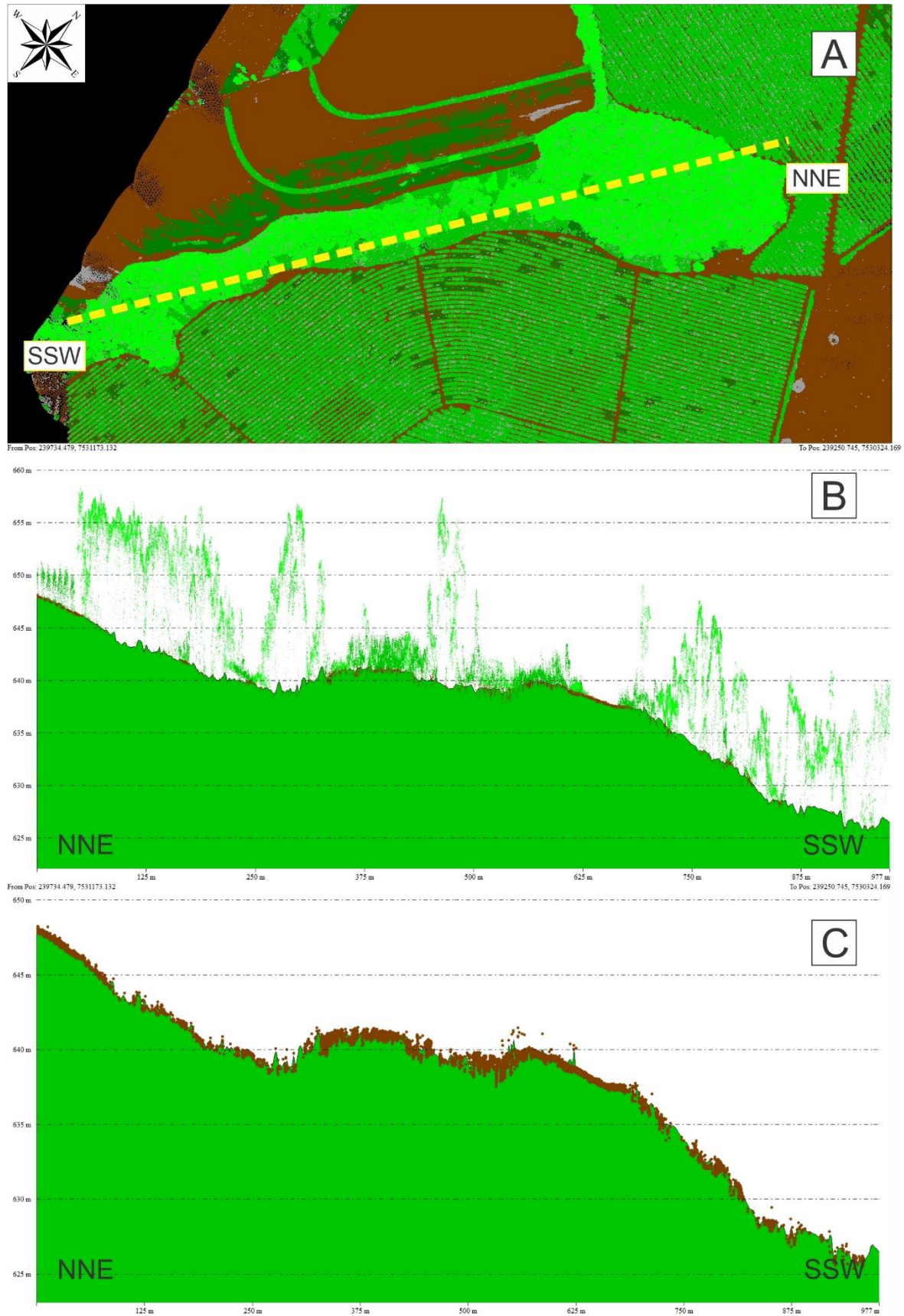
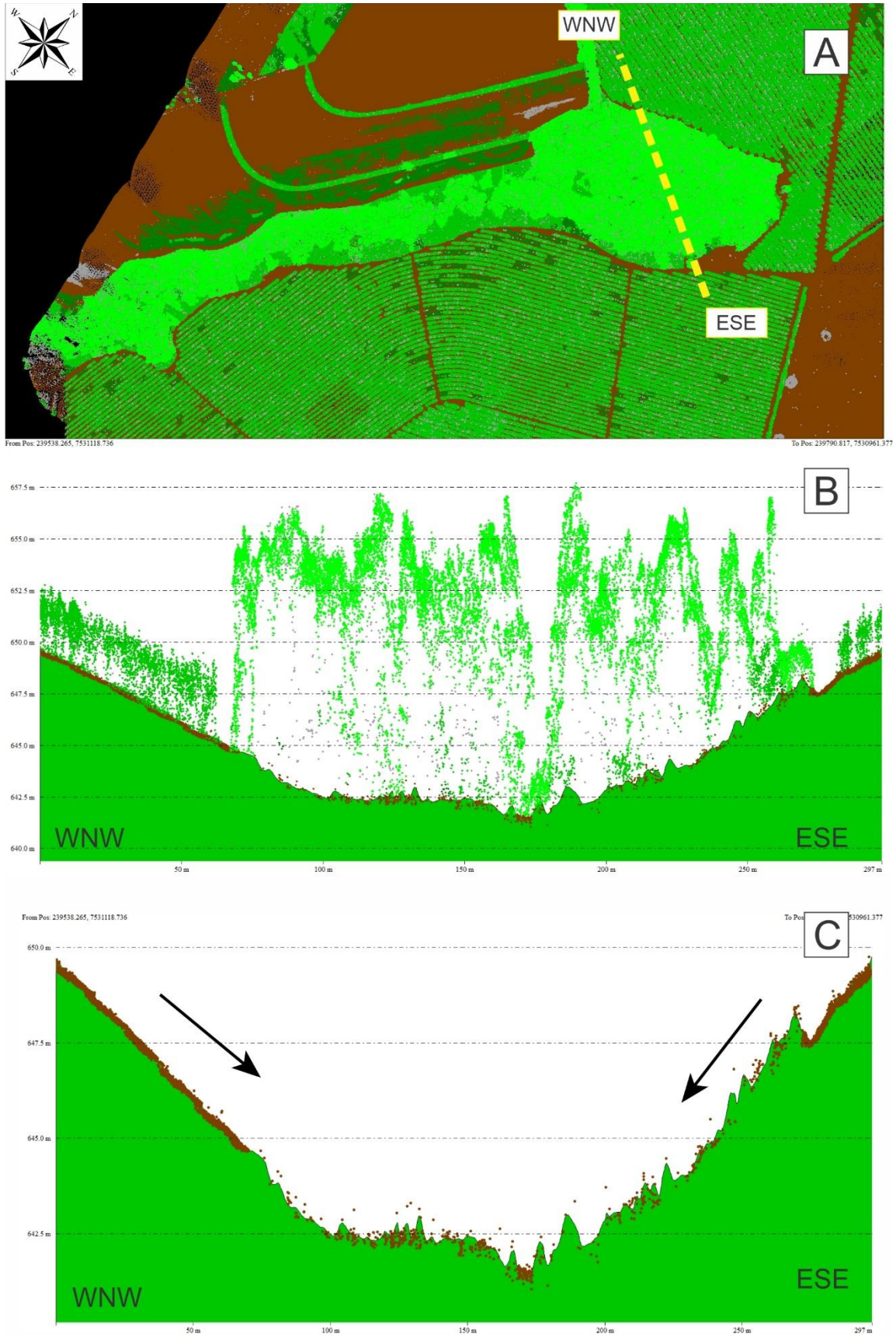


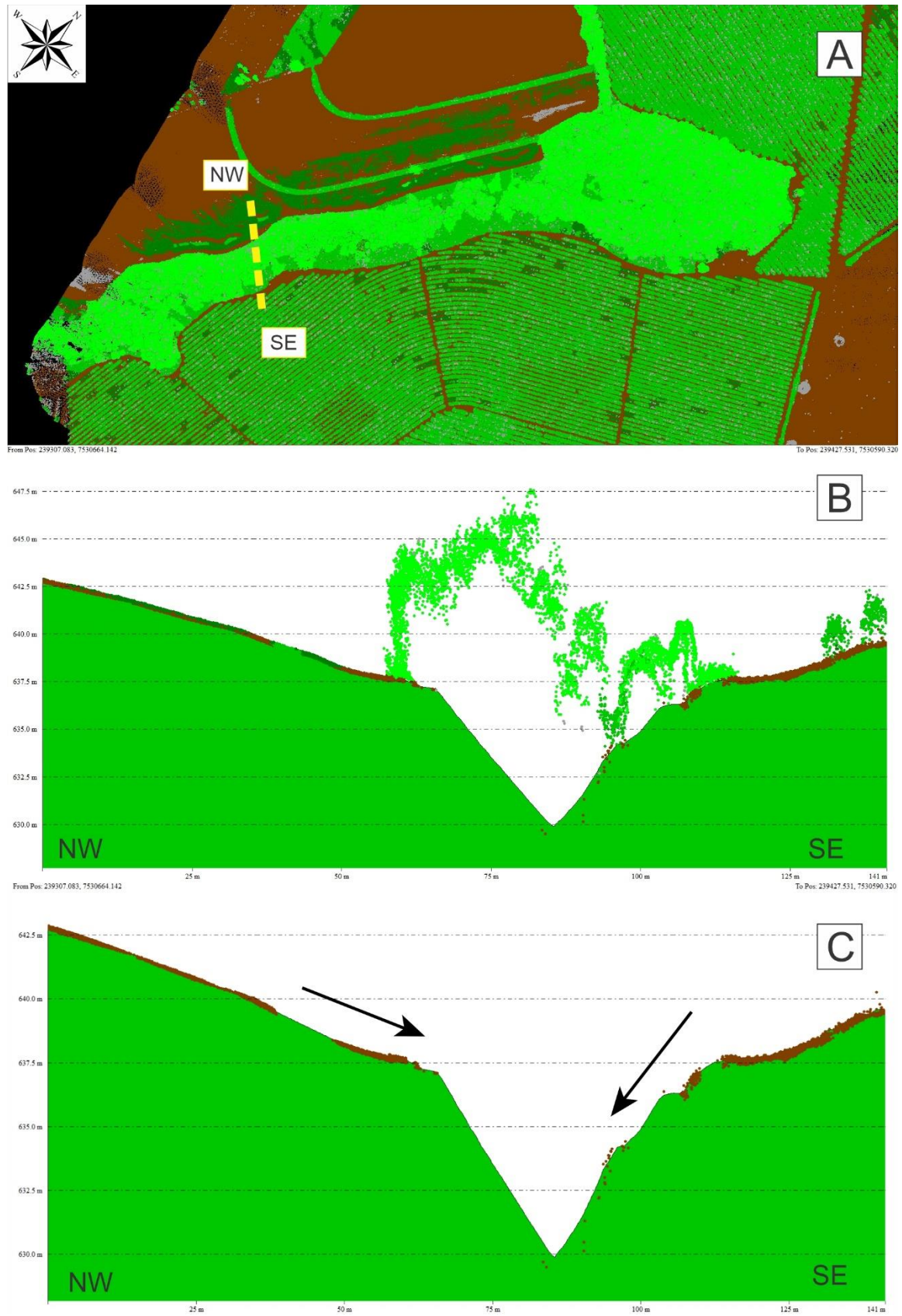
Figura 22. A) Direção do perfil traçado na cabeceira da drenagem. B) Perfil topográfico no MDS. C) Perfil topográfico no MDT.



A distribuição da vegetação acompanha a configuração morfológica da feição, com indivíduos de menor porte concentrados principalmente nas margens e nos setores adjacentes à drenagem. Em contrapartida, observa-se no interior da depressão uma maior ocorrência de vegetação de porte elevado, formando uma cobertura mais contínua ao longo do compartimento topograficamente rebaixado. A expressiva largura da feição e o reduzido grau de encaixamento do canal indicam uma morfologia compatível com ambientes de baixa declividade e reduzida capacidade de confinamento dos fluxos. Nesse contexto, a cabeceira pode representar um compartimento potencial de armazenamento e regulação hídrica, cuja configuração geomorfológica é potencialmente favorável à retenção temporária da água, ao aumento do tempo de permanência dos fluxos na paisagem e à ocorrência de processos de infiltração e circulação subsuperficial.

O perfil topográfico do médio curso (Figura 23) apresenta uma configuração morfológica distinta da observada na cabeceira, evidenciando maior organização do canal e incremento do grau de entalhamento da drenagem. As cotas do terreno variam aproximadamente entre 632 m e 640 m, resultando em uma amplitude altimétrica superior à observada na cabeceira. O setor central do perfil apresenta uma depressão mais pronunciada, associada ao canal principal de escoamento, delimitada por margens mais definidas e com maior gradiente topográfico.

Figura 23. A) Direção do perfil traçado no médio curso da drenagem. B) Perfil topográfico no MDS. C) Perfil topográfico no MDT.



A vegetação mantém-se distribuída ao longo de toda a seção transversal, porém acompanhando as variações morfológicas da drenagem. A presença de indivíduos de menor porte nas margens e setores elevados contrasta com a vegetação de maior altura associada às porções mais baixas do perfil. Essa organização espacial reflete a influência direta da topografia na distribuição da umidade e das condições de desenvolvimento da cobertura vegetal.

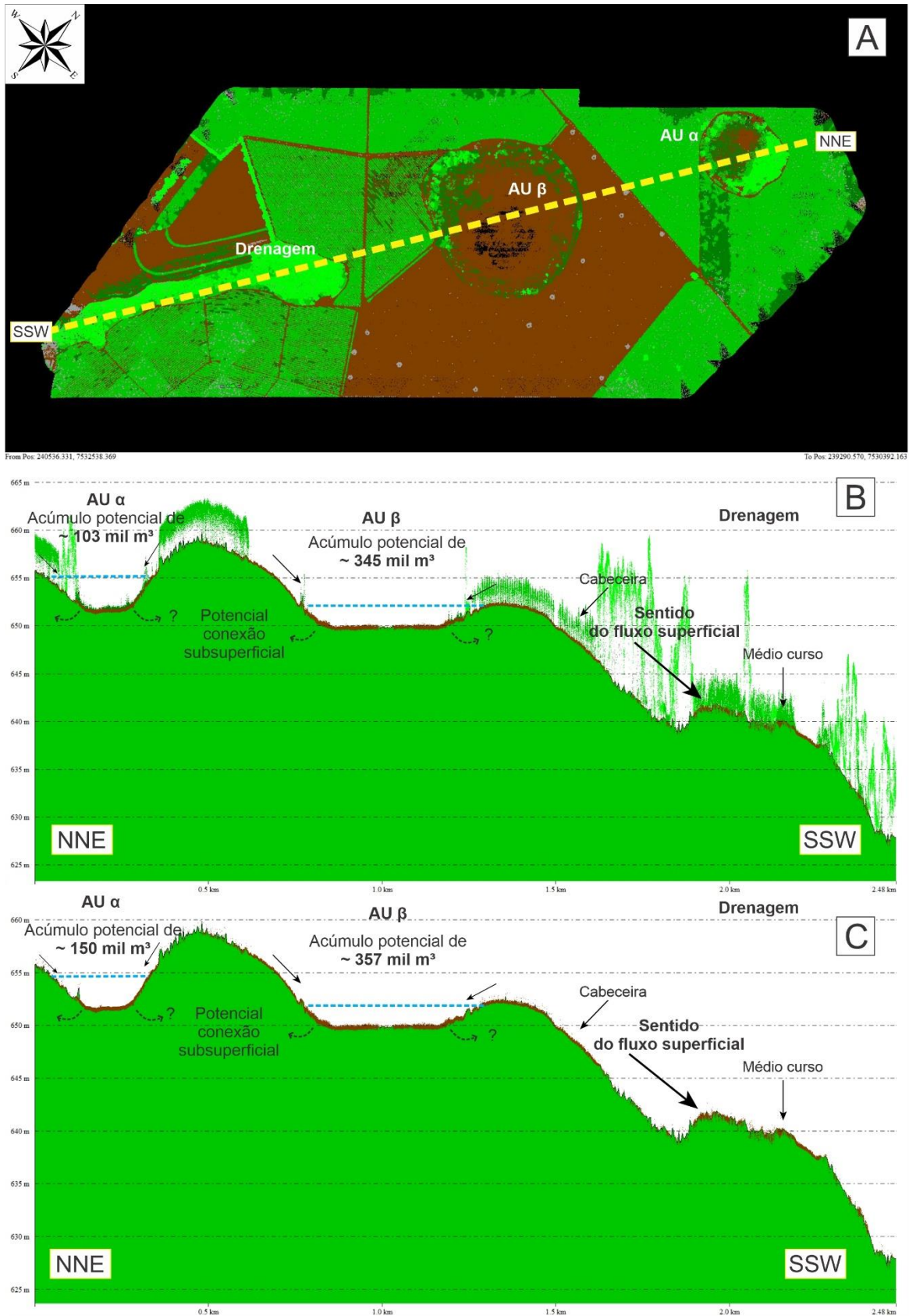
Do ponto de vista hidrogeomorfológico, o médio curso caracteriza-se como um setor de transferência e concentração dos fluxos hídricos. O maior encaixamento do canal e a ampliação das diferenças altimétricas em relação à cabeceira indicam aumento da capacidade de condução dos fluxos superficiais, evidenciando a transição entre os compartimentos de armazenamento localizados a montante e os setores de escoamento concentrado ao longo da drenagem principal.

4.5 Análise Integrada da Conectividade e Compartimentação Hidrogeomorfológica do Sistema Áreas Úmidas–Drenagem.

A análise individual das áreas úmidas e da drenagem permitiu caracterizar parâmetros geométricos, altimétricos e volumétricos específicos de cada feição. Entretanto, a compreensão do funcionamento hidrológico da área de estudo requer uma abordagem integrada, considerando a conectividade existente entre esses compartimentos da paisagem. Nesse contexto, as áreas úmidas e a drenagem podem constituir elementos interdependentes de um mesmo sistema hidrogeomorfológico, cuja dinâmica é controlada pela distribuição das cotas altimétricas, pela configuração do relevo e pelos processos de armazenamento, transferência e concentração dos fluxos hídricos.

Os modelos digitais gerados a partir dos dados LiDAR possibilitaram avaliar não apenas as características individuais das feições, mas também suas relações espaciais que exercem influência nas características funcionais destes ecossistemas. As áreas úmidas analisadas apresentaram cotas médias variando entre 653 m e 655 m, enquanto a drenagem foi caracterizada por uma cota de equilíbrio de 644,83 m. Essa diferença altimétrica de aproximadamente 8 a 10 m evidencia uma organização topográfica coerente do sistema, na qual as áreas úmidas ocupam posições relativamente mais elevadas da paisagem, atuando como zonas de retenção temporária de água, enquanto a drenagem representa o principal eixo de convergência e transferência dos fluxos superficiais e potenciais conexões subsuperficiais (Figura 24).

Figura 24. A) Direção do Transecto Hidrogeomorfológico. B) Perfil topográfico do sistema, com potencial de acúmulo, e potencial conexão, para as feições no MDS. C) Perfil topográfico do sistema, com potencial de acúmulo, e potencial conexão, para as feições no MDT.



Os resultados volumétricos obtidos para as áreas úmidas indicaram a existência de compartimentos com diferentes capacidades potenciais de armazenamento topográfico. Essas diferenças refletem as particularidades geomorfológicas de cada feição, incluindo sua extensão superficial, geometria e variações altimétricas internas.

Sob a perspectiva hidrogeomorfológica, as áreas úmidas funcionam como compartimentos de armazenamento temporário, favorecendo processos de infiltração, redução da velocidade do escoamento superficial e manutenção da umidade local. A drenagem, por localizada em um nível topográfico inferior as depressões analisadas, desempenha papel fundamental na concentração e condução dos fluxos hídricos provenientes dessas áreas, atuando como elemento integrador do sistema. Essa relação funcional demonstra que a dinâmica hídrica observada não depende exclusivamente da capacidade de armazenamento individual de cada feição, mas da interação contínua entre os diferentes compartimentos que compõem a paisagem.

Nesse sentido, os volumes calculados para AU α e AU β devem ser interpretados como estimativas da capacidade potencial de armazenamento topográfico das feições analisadas, derivadas da modelagem digital obtida por meio dos dados LiDAR. Assim, o cálculo de volume baseado no MDT totaliza para o sistema de áreas úmidas um potencial de armazenamento hídrico de aproximadamente 507.384,83 m³ e baseado no MDS de 449.161,70 m³ (Tabela 3).

Tabela 3. Potencial de armazenamento hídrico total do Sistema Áreas Úmidas - Drenagem.

Parâmetro	MDS	MDT
Volume Total (m ³)	449.161,70	507.384,83
Área Total (m ²)	215.730,00	236.900,00

5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos evidenciaram uma relação hidrogeomorfológica consistente entre as áreas úmidas e a drenagem principal presentes no transecto estudado. As áreas úmidas apresentaram cotas médias entre 653 m e 655 m, enquanto a drenagem foi caracterizada por uma cota de equilíbrio de 644,83 m, configurando um gradiente altimétrico de aproximadamente 8 a 10 m entre as feições. Essa diferença topográfica demonstra uma organização espacial coerente da paisagem, na qual as áreas úmidas ocupam posições relativamente mais elevadas e atuam como zonas de retenção permanente (Área Úmida Alfa) ou temporária (Área Úmida Beta) de água, enquanto a drenagem constitui o principal eixo de concentração e transferência dos fluxos hídricos.

As análises volumétricas realizadas permitiram quantificar a capacidade potencial de armazenamento associada às depressões das áreas úmidas. Estas atuam no armazenamento inicial e na retenção temporária da água, favorecendo processos de infiltração e amortecimento do escoamento superficial, enquanto a drenagem recebe, concentra e conduz os fluxos provenientes dessas áreas em direção aos setores mais baixos da paisagem. Assim, o cálculo de volume baseado no MDT totaliza para o sistema de áreas úmidas um potencial de armazenamento hídrico de aproximadamente 507.000 m³ e baseado no MDS de 449.000 m³.

Dessa forma, a capacidade de armazenamento observada não deve ser interpretada de maneira isolada para cada feição, mas como resultado da interação entre os diferentes compartimentos que compõem o sistema hidrogeomorfológico. A integração entre áreas úmidas e drenagem evidencia a existência de um sistema natural de retenção, transferência e redistribuição hídrica, controlado pela configuração topográfica local. Nesse contexto, os volumes obtidos representam estimativas da capacidade potencial de armazenamento topográfico das feições estudadas.

A coerência espacial observada entre as feições demonstra que os modelos gerados a partir dos dados LiDAR foram capazes de representar adequadamente a organização topográfica da área de estudo. Além disso, os resultados reforçam o potencial da tecnologia LiDAR aerotransportada em ARPs para a caracterização de ambientes hidrogeomorfológicos, permitindo identificar relações altimétricas sutis entre áreas úmidas, drenagens e demais elementos da paisagem, mesmo em ambientes com cobertura vegetal significativa.

Como perspectiva para estudos futuros, destaca-se a necessidade de investigar a ocorrência de fluxos subsuperficiais na área analisada, visando ampliar a compreensão das

interações hidrogeomorfológicas que controlam o funcionamento do sistema. A identificação e caracterização desses fluxos poderão fornecer evidências sobre o grau de integração entre os compartimentos superficiais, contribuindo para o entendimento da conectividade hidrológica e dos mecanismos responsáveis pela manutenção da dinâmica ambiental local. Dessa forma, a incorporação de métodos capazes de avaliar a circulação subsuperficial da água representa uma etapa importante para o aprimoramento do modelo conceitual da área e para uma caracterização mais abrangente do sistema estudado.

6. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ. **Localização**. Piracicaba: Fundação Agência das Bacias PCJ, [s.d.]. Disponível em: <https://agencia.baciaspcj.org.br/bacias-pcj/localizacao/>. Acesso em: 17 mar. 2026.

AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ. **Relatório de situação dos recursos hídricos nas bacias PCJ: ano base 2020**. Piracicaba: Fundação Agência das Bacias PCJ, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. ANAC. ARP – sigla “aeronave remotamente pilotada”». *ANACpédia*. Disponível em: <https://www2.anac.gov.br/anacpedia/sigpor/tr826.htm>. Acesso em: 12 nov. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. ANAC. Brazil has 1,2 million drones and 100 registered operators. *TI Inside Online*, 25 jul. 2025. Disponível em: <https://tiinside.com.br/en/25/07/2025/brasil-reune-12-milhao-de-drones-e-100-mil-operadores-cadastrados/>. Acesso em: 29 out. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. ANAC. Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial nº 94 (RBAC-E nº 94): Regras gerais para aeronaves não tripuladas. Brasília, 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/drones>. Acesso em: 28 out. 2025.

ALMEIDA, F. F. M. **Fundamentos geológicos do relevo paulista**. Boletim do Instituto Geográfico e Geológico, no 41. 1964.

AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. **ASPRS. LAS specification version 1.4 – R13**. Bethesda, 2013.

ANDERSON, K. *et al.* **Earth observation in service of the 2030 Agenda for Sustainable Development**. Remote Sensing of Environment, v. 217, p. 246–257, 2018.

ANOKYE, M. & HASHEMI-BENI, L. **Integrating LiDAR and multispectral remote sensing data for understanding wetland-flood dynamics: a literature review**. Frontiers in Environmental Science, 14, 1757715. 2026.

ATLAS AMBIENTAL DA BACIA DO RIO CORUMBATAÍ: **geologia**. [S. l.], 2011a. Disponível em: <http://www1.rc.unesp.br/igce/ceapla/atlasv3/geologia.php>. Acesso em: 16 set. 2025.

ATLAS AMBIENTAL DA BACIA DO RIO CORUMBATAÍ: **localização**. [S. l.], 2011b. Disponível em: <http://www1.rc.unesp.br/igce/ceapla/atlasv3/localizacao.php>. Acesso em: 16 set. 2025.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **ICA 100-40: Aeronaves não tripuladas e o acesso ao espaço aéreo brasileiro**. Rio de Janeiro: DECEA, 2026.

BRASIL. Ministério da Defesa. **Sistema de Cadastro de Levantamentos Aeroespaciais do Território Nacional (SISCLATEN)**. Brasília: Ministério da Defesa, 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **5º Relatório Nacional para a Convenção sobre Diversidade Biológica**. Brasília: MMA, 2019.

BRINSON, M. M. **A Hydrogeomorphic Classification for Wetlands**. U.S. Army Corps of Engineers, 1993.

CARBONNEAU, P. E.; DIETRICH, J. T. **Cost-effective non-metric photogrammetry from consumer-grade sUAS**: Implications for mapping and monitoring fluvial environments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016.

CASAGRANDE, L. **Mapeamento e caracterização de Áreas Úmidas e Geossistemas Isolados (AUGIs) no Estado de São Paulo**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Rio Claro, 2023.

CASAGRANDE, M. F. S., FURLAN, L. M., MOREIRA, C. A., ROSA, F. T. G. & ROSOLEN, V. **Non-invasive methods in the identification of hydrological ecosystem services of a tropical isolated wetland (Brazilian study case)**. *Environmental Challenges*, 5, 100233. 2021.

CHABOT, D.; HODGSON, A. J.; HODGSON, J. C.; ANDERSON, K. **‘Drone’: technically correct, popularly accepted, socially acceptable**: Different fields use different terms, but by changing its title, this journal is advocating for the discontinuation of ‘unmanned’ and recognition of ‘drone’ as an umbrella term for all robotic vehicles. *Drone Systems and Applications*, v. 10, n. 1, p. 399-405, 2022.

COLOMINA, I.; MOLINA, P. **Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing**: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 92, p. 79–97, 2014.

COMITÊS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ. **Deliberações e estudos técnicos para gestão da disponibilidade hídrica nas bacias PCJ**. Piracicaba: Comitês PCJ, 2007.

COMITÊS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ. **Estudo do uso dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do Rio Jaguari: alternativas para abastecimento de água – Volume II**. Relatório técnico n. 1395-FAP-01-RH-RT-0005, rev. 1, v. 2, p. 20. 2020.

COMITÊS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ. **Plano das Bacias PCJ 2020–2035**. Piracicaba: Comitês PCJ, 2020.

CUNHA, E. R. e BACANI, V. M. **Sensoriamento remoto e SIG aplicados ao mapeamento geomorfológico da bacia hidrográfica do córrego Indaiá**. *Geosp – Espaço e Tempo* (Online), v. 19, n. 3, p. 630-646. 2016.

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO. **DECEA**. Regras do Espaço Aéreo para o Uso de Drones no Brasil. 2021. Disponível em: <https://www.decea.mil.br/>. Acesso em: 28 out. 2025.

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO (DECEA). **SARPAS: Sistema de Solicitação de Acesso ao Espaço Aéreo para Aeronaves Não Tripuladas**. 2026. Disponível em: <https://sarpas.decea.mil.br/login>. Acesso em: 20 de abril 2026.

DING, Q.; CHEN, W.; KING, B. **Analysis of LiDAR’s ability in wetland investigation: a case study in Yellow River Delta**. *INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT*, 34., 2011.

FRANCO, I. O.; SARDINHA, D. S.; FURLAN, L. M.; CASAGRANDE, M. F. S., MOREIRA, C. A. & ROSOLEN, V. **Subsurface flow pathway and hydrochemistry of a geographically isolated depression wetland in the Serra Geral Diabase Formation, São Paulo State, Brazil.** *Discover Geoscience*, 2(1), 20. 2024.

FILOSO, S., DO CARMO, J.B., MARDEGAN, S.F., LINS, S.R.M., GOMES, T.F., MARTINELLI, L.A. **Reassessing the environmental impacts of sugarcane ethanol production in Brazil to help meet sustainability goals.** *Renew. Sust. Energ. Rev.*, [s.l.]. 52, 1847–1856. 2015.

FULLER, M. R.; EBERSOLE, J. L.; DETENBECK, N. E.; LABIOSA, R. **Integrating thermal infrared stream temperature imagery and spatial stream network models to understand natural spatial thermal variability in streams.** *Journal of Thermal Biology*, v. 100, p. 103028, 2021.

FURLAN, L. M.; JUNQUEIRA, D. A.; MOREIRA, C. A.; ROSOLEN, V. **Pequenas Áreas Úmidas Geograficamente Isoladas do Setor de Cuesta e Depressão Periférica Paulista: Inventário, Hidrologia e Governança Ambiental.** In: JUNK, W. J.; CUNHA, C. N. da. (Org.). *Inventário das Áreas Úmidas Brasileiras: Distribuição, ecologia, manejo, ameaças e lacunas de conhecimento*. 1. ed. Cuiabá - MT: Carlini & Caniato Editorial, v. 1, p. 619-631. 2024.

FURLAN, L. M.; ROSOLEN, V.; MOREIRA, C. A.; BUENO, G. T.; FERREIRA, M. E. **The interactive pedological-hydrological processes and environmental sensitivity of a tropical isolated wetland in the Brazilian Cerrado.** *SN Applied Sciences*, v. 3, art. 144, 2021.

GOMES, R. F. T., MOREIRA, C. A., VANIA, R., MATHEUS, C., BOVI, R. C. & FURLAN, L. M. **Detection of aquifer recharge zones in isolated wetlands: comparative analysis among electrical resistivity tomography arrays.** *Pure & Applied Geophysics*, 179(4), 1275-1294. 2022.

GONÇALVES, J. A.; HENRIQUES, R. **UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas.** *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 104, p. 101–111, 2015.

GUO, M.; LI, J.; SHENG, C.; XU, J.; WU, L. **A review of wetland remote sensing.** *Remote Sensing*, v. 9, n. 7, p. 641, 2017.

HARWIN, S.; LUCIEER, A. **Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from UAV imagery.** *Remote Sensing*, v. 4, n. 6, p. 1573–1599, 2012.

HESS, L. L. et al. **Wetlands of the Lowland Amazon Basin: Extent, Vegetative Cover, and Physical Properties from Synthetic Aperture Radar and Optical Data.** *Remote Sensing of Environment*, v. 87, p. 404–428, 2015.

HOEK SPAANS, R.; SILVEIRA, B. D.; VAN DAALEN, K.; RORATO VITOR, A. C. *et al.* **Ethical considerations related to drone use for environment and health research: a scoping review protocol.** *PLOS ONE*, v. 19, n. 1, e0287270, 2024.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico 2022: resultados preliminares.** Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE-PPP: serviço online de posicionamento por ponto preciso**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 08 de mai. 2026.

INSTITUTO GEOLÓGICO; DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **Mapa de aquíferos do estado de São Paulo**. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, 2005.

JUNK, W. J.; NUNES DA CUNHA, C. **Pantanal: a large South American wetland at a crossroads**. *Ecological Engineering*, v. 24, n. 4, p. 391–401, 2005.

JUNK, W. J.; PIEDADE, M. T. F.; PAROLIN, P.; WITTMANN, F.; SCHÖNGART, J. **Ecophysiology, biodiversity and sustainable management of Central Amazonian floodplain forests: a synthesis**. Dordrecht: Springer, 2011.

JUNK, W. J., PIEDADE, M. T. F., LOURIVAL, R., WITTMANN, F., KANDUS, P., LACERDA, L. D., ... & CAMARGO, E. **Definição e classificação das Áreas Úmidas (AUs) brasileiras: base científica para uma nova política de proteção e manejo sustentável**. Classificação e delineamento das Áreas Úmidas brasileiras e de seus macrohabitats, 1. 2014.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. Hoboken: Wiley, 7. ed. 2015.

LEIBOWITZ, S. G. **Geographically isolated wetlands: why we should keep the term**. *Wetlands*, Cham, v. 35, n. 5, p. 997–1003, 2015.

LUCIEER, A.; DE BELD, G.; TURNER, D. **Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and UAV data**. *Landslides*, v. 11, n. 5, p. 1–12, 2014.

MARTINS, M. N. **Aplicações de VANTs no monitoramento de águas continentais**. 51 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

MICIELI, M.; BOTTER, G.; MENDICINO, G.; SENATORE, A. **UAV thermal images for water presence detection in a mediterranean headwater catchment**. *Remote Sensing*, v. 14, n. 1, p. 108, 2021.

MILANI, E.; MELO, J.H.G.; SOUZA, P.A. **Bacia do Paraná**. *Boletim de Geociências - Petrobras* 15(2):265-287. 2007.

MITSCH, W. J.; GOSSELINK, J. G. **Wetlands**. 5. ed. Hoboken: Wiley, 2015. Disponível em: http://archive.org/details/Wetlands_5th_Edition_by_William_J._Mitsch_James_G._Gosselink/page/12/mode/1up. Acesso em: 1 out. 2025.

PEREIRA, L. H.; PINTO, S. A. F. **Utilização de imagens aerofotográficas no mapeamento multitemporal do uso da terra e cobertura vegetal na bacia do rio Corumbataí – SP, com o suporte de sistemas de informações geográficas**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., Florianópolis. Anais... São José dos Campos: INPE, p. 1321–1328. 2007.

PERROTTA, M. M. *et al.* **Geologia e recursos minerais do estado de São Paulo: Sistema de Informações Geográficas - SIG**. Rio de Janeiro: CPRM, 2006. Programa Geologia do Brasil.

PROJETO MAPBIOMAS. **Coleção 10.1 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil**. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/>. Acesso em: 08 mar. 2026.

RAMSAR CONVENTION SECRETARIAT. **An Introduction to the Convention on Wetlands**. Gland, Switzerland, 2016.

RAPINEL, S.; HUBERT-MOY, L.; CLÉMENT, B. **National wetland mapping using remote sensing-derived environmental variables**. *Heliyon*, v. 9, n. 1, e12838, 2023.

REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 3. ed. São Paulo: Escrituras, 2006.

RESOP, J. P.; LEHMANN, L. & HESSION, W. C. **Drone laser scanning for modeling riverscape topography and vegetation: Comparison with traditional aerial lidar**. *Drones*, 3(2), 35. 2019.

ROSOLEN, V. *et al.* **Contamination of wetland soils and floodplain sediments from agricultural activities in the Cerrado Biome (State of Minas Gerais, Brazil)**. *Catena*, v. 128, p. 203-210, 2015.

ROSOLEN, V., FURLAN, L. M. & MOREIRA, C. A. **Wetlands: Hydrological Processes and Impacts**. In *Routledge Handbook of Wetlands* (pp. 26-37). Routledge. 2025.

SALES, J. C., BUENO, G. T., ROSOLEN, V., FERREIRA, M. E. & FURLAN, L. M. **The structure of an earth-mound field of the Brazilian Savanna**. *Geomorphology*, 386, 107752. 2021.

SANTOS, R. M.; GARCIA, G. J. **Caracterização hidroambiental da bacia do rio Corumbataí (SP)**. Rio Claro: UNESP, 2013.

SÃO PAULO (Estado). **Plano estadual de recursos hídricos do estado de São Paulo**. São Paulo: DAEE, 2018.

SEDANO-CIBRIÁN, J.; PÉREZ-ÁLVAREZ, R.; DE LUIS-RUÍZ, J. M.; PEREDA-GARCÍA, R.; SALAS-MENOCAL, B. **Thermal water prospection with uav, low-cost sensors and GIS. Application to the Case of La Hermida**. *Sensors*, v. 22, n. 18, p. 6756, 2022.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB). **Aquíferos: a riqueza subterrânea vital para a segurança hídrica do Brasil**. 2025. Disponível em: <https://www.sgb.gov.br/w/aquiferos-a-riqueza-subterranea-vital-para-a-seguranca-hidrica-do-brasil>. Acesso em: 19 mar. 2026

SMITH, R. D. *et al.* **An approach for assessing wetland functions using hydrogeomorphic classification**, 1995.

SINDICATO NACIONAL DA AVIAÇÃO AGRÍCOLA. **SINDAG**. Drones na agricultura brasileira: crescimento e perspectivas. 2024. Disponível em: <https://news.agropages.com/News/NewsDetail---54433.htm>. Acesso em: 29 out. 2025.

SIQUEIRA, L. F. S. **Tectônica deformadora em sinéclises intracratônicas: a origem do Alto Estrutural de Pitanga, Bacia do Paraná, SP**. 2011. Dissertação (Mestrado em Geotectônica) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011.

TINER, R. W. **Estimated extent of geographically isolated wetlands in selected areas of the United States**. *Wetlands*, 23(3), 636-652. 2003.

TRIPATHI, R. N.; RAMACHANDRAN, A.; TRIPATHI, V.; BADOLA, R.; HUSSAIN, S. A. **Bird monitoring intelligence: integrating thermal uav imagery and deep learning tools.** International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering, v. 12, n. 21 s, p. 1283-1290, 2024.

TURNER, D.; LUCIEER, A.; WATSON, C. **An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution UAV imagery.** Remote Sensing, v. 4, n. 5, p. 1392–1410, 2012.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). **LiDAR for improved mapping of wetland resources and assessment of wetland conservation practices.** Washington, DC: Natural Resources Conservation Service, 2014.

VAS, E. *et al.* **Approaching birds with drones: first experiments and ethical guidelines.** Biology Letters, v. 11, n. 2, 2015.

XU, T.; WENG, B.; YAN, D.; WANG, K.; LI, X., BI, W.; ... & LIU, Y. (2019). **Wetlands of international importance: Status, threats, and future protection.** International journal of environmental research and public health, 16(10), 1818. 2019.

ZÁLAN, P. V. *et al.* **A Bacia do Paraná.** In: GABAGLIA, G. P. R.; MILANI, E. J. (Ed.). Origem e evolução de bacias sedimentares. Rio de Janeiro: PETROBRÁS, p. 13. 1990.